

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektrotechniky

Návrh pohonů pro model vodní elektrárny
Design of drives for hydroelectric power plant model

2019/2020

Petr Staňura

Zadání bakalářské práce

Student: **Petr Staňura**

Studijní program: B2648 Projektování elektrických zařízení

Téma: **Návrh pohonů pro model vodní elektrárny**
Design of drives for hydroelectric power plant model

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Provedte analýzu hydraulického systému modelu vodní elektrárny.
2. Navrhněte pohony pro simulování funkce vodní elektrárny.
3. Popište chování a zvolené režimy provozu navrženého řešení po konzultaci s vedoucím bakalářské práce.

Seznam doporučené odborné literatury:

Noskievič, J.: Dynamika tekutinových mechanismů. VŠB-TU Ostrava, 1995. ISBN 80-7078-297-8.
Caga, R.: Řízení laboratorního modelu malé vodní elektrárny [pdf]. Ostrava, 2015, Diplomová práce. VŠB - TUO.
Šoukal, J.: Řízení pohonu čerpadel. Olomouc, 2014. Podkladová studie hydraulické části pro Fakultu elektrotechniky a informatiky VŠB-TUO.
Další literatura dle pokynů vedoucího bakalářské práce.


Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Libor Štěpanec, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2019

Datum odevzdání: 30.04.2020





doc. Ing. Vítězslav Stýskala, Ph.D.
vedoucí katedry


prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě, dne *12. května 2020*


.....
podpis studenta

Poděkování

Rád bych poděkoval panu Ing. Liboru Štěpěncovi, Ph.D. za odbornou pomoc a konzultaci při vytváření této bakalářské práce. Dále bych rád poděkoval panu Ing. Václavu Sládečkovi, Ph.D. za pomoc při zprovoznění a při měření na modelu malé vodní elektrárny a v neposlední řadě panu doc. Ing. Vítězslavu Stýskalovi, Ph.D. za to, že mi umožnil a podpořil mě ve zpracování této bakalářské práce, a také své rodině, která mi po celou dobu umožnila pracovat v příjemném a klidném prostředí.

Abstrakt

Malé vodní elektrárny si v dnešní době získávají stále větší pozornost. Stále větší využití mají takzvané mikro zdroje (mikro vodní elektrárny) o výkonu jednotek, maximálně pár desítek kW, které využívají čerpadlo, které funguje jako turbína. Tyto aplikace jsou levné, nenáročné na údržbu a nabízejí řešení pro napájení odlehlých objektů zejména v horských oblastech. Cílem této bakalářské práce je zanalyzovat chování stávajícího modelu a navrhnout takovou topologii, aby bylo možné provozovat motor s turbínou jako generátor dodávající elektrickou energii, například pro domácnost fungující v ostrovním režimu.

Klíčová slova

Malá vodní elektrárna, Model malé vodní elektrárny, Asynchronní generátor, Asynchronní motor, Měnič kmitočtu, Vodní čerpadlo, Vodní turbína

Abstract

Small hydropower plants are getting more and more attention in present days. There is more utilization for so called micro sources (micro hydropower plants) with output power of couple of units, maximum couple of tens of kW, which use water pump as a turbine. Those applications are cheap, low maintenance demanding and provide solution as a power source for remote objects specially in mountain regions. Aim of this bachelor thesis is to analyze the behavior of current model setup and design a topology which allows to use the motor with turbine as a generator supplying, for example household operating in island mode, with electricity.

Key words

Small hydropower plant, Model of small hydropower plant, Asynchronous generator, Asynchronous motor, Frequency converter, Water pump, Water turbine

Obsah

Seznam použitých zkratk.....	7
Seznam obrázků	8
Úvod.....	9
1 Využití energie vodního zdroje	11
1.1 Malé vodní elektrárny	11
1.2 Vodní turbíny	14
1.2.1 Peltonova turbína.....	15
1.2.2 Francisova turbína	16
1.2.3 Vrtulová a Kaplanova turbína	16
1.2.4 Bánkiho turbína	17
1.2.5 Odstředivá čerpadlová turbína.....	17
2 Výroba elektřiny v malých vodních elektrárnách	22
2.1 Asynchronní stroj	22
2.2 Řízení otáček asynchronního motoru	27
3 Model malé vodní elektrárny v laboratoři FEI.....	31
3.1 Popis modelu MVE a stávající topologie	31
3.2 Měření na modelu MVE.....	37
4 Návrh modernizace laboratorního modelu MVE	46
4.1 Senzor tlaku.....	46
4.2 Senzor průtoku	47
4.3 MVE CONTROL 400	48
5 Zapojení elektrických komponent pro modernizaci modelu MVE	50
Závěr	51
Seznam příloh.....	53
Použitá literatura	54

Seznam použitých zkratek

Zkratka	Význam
<i>AG</i>	Asynchronní generátor
<i>AIM</i>	Active Interface Module (Síťový filtr pro ALM)
<i>ALM</i>	Active Line Module (Pulsní usměrňovač SINAMICS S120)
<i>AM</i>	Asynchronní motor
<i>AS</i>	Asynchronní stroj
$\cos \varphi$	Účinník
<i>ČR</i>	Česká republika
<i>DN</i>	Jmenovitá světlost potrubí (Diameter Nominal)
<i>GTO</i>	Vypínací tyristor (Gate turn-off)
<i>IE2</i>	Třída účinnosti – zvýšená účinnost (High efficiency)
<i>IGBT</i>	Výkonový tranzistor (Insulated gate bipolar tranzistor)
<i>IGCT</i>	Výkonový tyristor (Integrated Gate-Commutated Thyristor)
<i>MVE</i>	Malá vodní elektrárna
<i>Off-grid</i>	Není připojený k distribuční síti
<i>PC</i>	Osobní počítač (Personal computer)
<i>S120</i>	Modelová řada výkonové elektroniky Siemens
<i>SMM</i>	Single Motor Module (Napěťový střídač SINAMICS S120)
<i>THDi</i>	Celkové harmonické zkreslení proudu (Total harmonic distortion)
<i>THDu</i>	Celkové harmonické zkreslení napětí (Total harmonic distortion)
<i>VE</i>	Vodní elektrárna
<i>VŠB-TUO</i>	Vysoké škola báňská – Technické univerzita Ostrava
$3f$	Trojfázová soustava

Seznam obrázků

Obr. 1.1 Příklad situace velikosti hrubého a čistého spádu [4]	13
Obr. 1.2 Křivky překročení spádu a průtoku v závislosti na počtu dní v roce [4].....	14
Obr. 1.3 Peltonova turbína a tvary lopatek a) válcovitá b) elipsoidická [1].....	15
Obr. 1.4 Oběžné kolo Francisovy turbíny [1]	16
Obr. 1.5 Kaplanova turbína a zařízení pro natáčení lopatek [1].....	16
Obr. 1.6 Bánkiho turbína (upraveno) [7].....	17
Obr. 1.7 Odstředivé čerpadlo (upraveno) [8]	18
Obr. 1.8 Rozložení rychlosti při čerpadlovém (vlevo) a turbínovém (vpravo) režimu (upraveno) [10]	19
Obr. 1.9 Rozložení kavitace při čerpadlovém (vlevo) a turbínovém (vpravo) režimu (upraveno) [10]	20
Obr. 1.10 Řez odstředivým čerpadlem Sigma 40-NVE [12].....	21
Obr. 2.1 Výkonová bilance AM [14]	23
Obr. 2.2 Výkonová bilance AG [14]	25
Obr. 2.3 Pracovní režimy asynchronního stroje [13]	27
Obr. 2.4 Blokové schéma nepřímého měniče kmitočtu napětového typu (nahore) a proudového typu (dole)(upraveno) [17].....	28
Obr. 2.5 Nepřímý měnič kmitočtu s napětovým pulsním usměrňovačem [20]	28
Obr. 2.6 Zobrazení prostorového vektoru proudu v souřadných soustavách [21]	29
Obr. 2.7 Regulační struktura vektorového řízení AM bez snímače otáček [22]	30
Obr. 3.1 Fotografie modelu MVE	32
Obr. 3.2 Hydraulické schéma modelu MVE [3]	32
Obr. 3.3 Výkonnostní křivka čerpadla NVE 2900 ot·min ⁻¹ (upraveno) [23].....	34
Obr. 3.4 Výkonnostní křivka čerpadla NVE 1450 ot·min ⁻¹ (upraveno) [23].....	34
Obr. 3.5 Současná topologie zapojení pohonů MVE [24]	35
Obr. 3.6 Schéma zapojení výkonové části pohonů MVE [24]	36
Obr. 3.7 Výkonové charakteristiky turbíny	38
Obr. 3.8 Výkonové poměry modelu MVE	39
Obr. 3.9 Přehled účinností.....	41
Obr. 3.10 Graf závislosti $\cos\phi$	42
Obr. 3.11 Měření účinníku	43
Obr. 3.12 Graf závislosti sledovaných veličin při řízení konstantním momentem	44
Obr. 4.1 Manometr PG2454 taa způsob zapojení OUT1 spínací výstup, OUT2 analogový výstup [25]	46
Obr. 4.2 Průtokový senzor SA5000 [26].....	47
Obr. 4.3 MVE CONTROL 400 [27]	48
Obr. 4.4 Optimální otáčky generátoru, získané systémem VONSCH MVE CONTROL [27]	49

Úvod

Malé vodní elektrárny zažily největší rozmach na konci 19. a v první polovině 20. století. Zatímco v Česku a na Slovensku se v průběhu druhé poloviny 20. století MVE převážně rušily, jejich počet v Západní Evropě a v Americe spíše stoupal. Samozřejmě se zde, stejně jako u nás, budovala velká vodní díla. Tento pohled na MVE se v 80. a v 90. letech změnil a MVE se začaly rekonstruovat a uvádět znovu do provozu. Zlom přinesla změna politického režimu, rozvoj a dostupnost výkonové elektroniky a řídicích systémů a v neposlední řadě také snaha nalezení ekologických cest k získávání elektrické energie.

V dnešní době se požadavky na dodávku elektrické energie stále zvyšují, zásoby fosilních paliv se ztenčují a jejich cena roste. Vnikají různé alternativní metody výroby elektrické energie. Je zde celosvětová snaha získávat energii z obnovitelných zdrojů (slunce, voda, vítr). Jde o koncepci nazývanou „Green Energy“. Takové získávání energie sebou nese ale spoustu problémů, jako například stabilita dodávky, efektivní přenos, ekologický, ekonomický a estetický dopad.

Díky rozvoji výkonové elektroniky a akumulátorů se v poslední době zdá jako zajímavé řešení decentralizace výroby a rozvodů elektrické energie. Ve vyspělých zemích světa nebývá problém s dodávkou nebo zajištěním elektrické energie téměř nikde. Jediné problémy představují odlehlé a vysokohorské oblasti, kterých však například v Evropě není mnoho. Zde jde spíše o celkové šetření s energií a dosažení tzv. „zeleného“ progresu v oblasti výroby elektřiny. Navíc je energetický potenciál vodních toků ve vyspělých zemích, pro stavbu větších vodních elektráren, téměř vyčerpán a zbývají opravdu jen vysokohorské potoky nebo velice netradiční zdroje ve vodohospodářství.

Naprosto jiná situace je však v rozvojových zemích. Zejména v horských oblastech a zemích v okolí rovníku se jeví jako ideální zdroj elektrické energie právě voda. Kvůli nedostačující elektrické síti a výkonnosti zdrojů, zde způsobil značné problémy stále se zvětšující hlad po elektrické energii. Síť je v těchto místech „měkká“, nastávají zde časté výpadky, anebo vesnice nejsou elektrifikovány vůbec.

Pokud se v blízkosti těchto problémových oblastí vyskytují vodní zdroje o potenciálním výkonu alespoň několik kW, je velice výhodné zde vybudovat MVE. Takové elektrárny mohou pracovat do stávající elektrické sítě, což výrazně zvyšuje její stabilitu, nebo je možné vytvořit izolovanou síť pro budovu, skupinu budov, či celou vesnici. Tato problematika je velmi aktuální téma například v Indii, kde se opravdu mnoho lidí zabývá řešením a zdokonalením MVE, v Thajsku, Indonésii, Vietnamu nebo třeba i v Afghánistánu.

Pokud se jedná o elektrárny od několika desítek do stovek kW většinou se využívá klasického uspořádání MVE (tzn. konvenční turbína – Kaplan, Francis, Pelton), jedná-li se však o velice malé zdroje, tak se stále více začínají využívat jako turbíny odstředivá čerpadla v reverzním chodu s asynchronními generátory. Obrovskou výhodou je dostupnost, nízká pořizovací cena a velmi snadná údržba. Navíc je voda nejpředvídatelnější obnovitelný zdroj.

V této práci se budu zabývat analýzou a zhodnocením funkčnosti stávajícího laboratorního modelu MVE, tento oddíl bude z části navazovat a vycházet z poznatků diplomových prací již realizovaných na tomto modelu. Bc. Radek Caga se zabýval způsoby řízení tohoto modelu a souvislostmi mezi elektrickými mechanickými a hydrodynamickými veličinami. Bc. Marek Schmidt se zabýval možností využití komponentů SINAMICS S120 na modelu MVE, jejich nastavením, řízením a chováním.

Dále se budu zabývat a sledovat tok energie v celém systému. Pro tuto část bakalářské práce bude provedeno kontrolní měření se stávajícími komponenty a nastavením, vycházejícím z diplomové práce Bc. Marka Schmida. Výsledky těchto měření budou popsány a zhodnoceny v následujících kapitolách.

Cílem této práce je návrh možné inovace laboratorního modelu MVE takovým způsobem, aby se odstranily nevýhody vyplývající ze stávající topologie a nalezení nového využití modelu pro potenciální výzkum v oblasti využití energie malých vodních zdrojů, napájení malých spotřebitelů, například rodinných domů, nebo dodávka do elektrizační sítě v místech s nízkou stabilitou dodávky elektrické energie.

Pro návrh takové inovace bylo potřeba porozumět základům hydraulických systémů, zejména hydromotorům, potažmo hydrogenerátorům, dále koncepci malých vodních elektráren a problematice využití odstředivého čerpadla jako turbíny, které jsem se věnoval více dopodrobna, protože je velice důležitá k pochopení chování laboratorního modelu MVE při různých režimech. S tím samozřejmě souvisí téma provozování asynchronního motoru v generátorickém režimu a jeho řízení s možností rekuperace energie. Tato témata budou proto rozebrána v následujících kapitolách.

Nejproblematictější oblastí, při výrobě elektrické energie z malých vodních zdrojů s využitím čerpadlové turbíny a asynchronního generátoru, je nalezení nebo návrh vhodného zařízení, které umožňuje výrobu elektřiny v širokém rozmezí průtoků a spádů. Malé vodní zdroje mají tendenci vykazovat vysokou proměnlivost. A proto je velice výhodné se těmto změnám rychle přizpůsobovat, abychom dosáhli co největší efektivity výroby elektrické energie. V ideálním případě s co největší účinností v průběhu co nejdelšího období v roce.

1 Využití energie vodního zdroje

Lidé se snaží využívat vodní energii ve svůj prospěch již od pradávna. Důkazy o použití vodního kola s vertikální osou sahají až do 2. století př. n. l. na Balkánském poloostrově. Takováto soustrojí se používala pro pohon mlýnských kamenů. V 1. století př. n. l. se začalo používat Vodní kolo s horizontální osou na tzv. Vitruviovém vodním mlýnu. Postupem času se začíná vodní energie využívat nejen k mletí obilí, ale celkově k ulehčení práce.

V 17. století se začínají objevovat kola využívající dynamického účinku vody, což napomáhá začátku vývoje rovnotlaké vodní turbíny.

Na konci 18. dosáhl vývoj vodního kola svého konce. Účinnost nejmodernějších vodních kol dosahovala až 85 %. Průměr kol se pohyboval od 2 až do 20 metrů a nevyšší dosažený výkon byl 330 kW. Nevýhodou vodních kol jsou hlavně jejich rozměry a velice nízké otáčky, proto je potřeba složité převodování do rychla, což sebou nese značné energetické ztráty a tím pádem pokles účinnosti celého soustrojí. [1]

Dalším vývojovým stupněm se staly vodní turbíny, a zvláště jejich spojení s elektrickými generátory. Podíl světové výroby elektřiny ve vodních elektrárnách činí okolo 16 % [2], což je nezanedbatelná část a s rostoucím politickým tlakem na využití obnovitelných zdrojů se realizace staveb malých vodních elektráren jeví jako jedna z perspektivních cest.

1.1 Malé vodní elektrárny

Malá vodní elektrárna je obecně vodní elektrárna dosahující výkonu maximálně do 10 MW. Dále lze tyto MVE dělit podle výkonu následovně:

- domácí VE s instalovaným výkonem do 35 kW
- mikro VE s instalovaným výkonem od 35 kW do 100 kW
- mini VE s instalovaným výkonem od 100 kW do 1 MW
- průmyslové VE s instalovaným výkonem od 1 MW do 10 MW

Dále se dají dělit podle získaného spádu, charakteru pracovního režimu, umístění strojovny, velikosti spádu atd.

Z pohledu této práce je však nejdůležitější dělení podle instalovaného výkonu. Podle tohoto kritéria spadá turbína modelu MVE do kategorie domácích VE. Předpoklad je, že by měla být schopná napájet standardní rodinný dům.

Při rozhodování o zřízení MVE je velice důležité mít dobré informace o spádových a průtokových poměrech v dané oblasti. Dosažitelný výkon lze předběžně odhadnout podle vzorce

$$P = 7 \cdot Q \cdot H \quad (kW; m^3 \cdot s^{-1}; m) \quad (1.1)$$

kde P je výkon, Q je průměrný průtok a H je průměrný spád.

Pro MVE je výchozí rovnice pro výpočet výkonu hydroenergetického zdroje,

$$P = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \cdot \eta_c \quad (W; kg \cdot m^{-3}; m \cdot s^{-2}; m^3 \cdot s^{-1}; m; -) \quad (1.2)$$

kde P je výkon hydrodynamického zdroje, ρ je hustota kapaliny, g je tíhové zrychlení, Q je průtok vodním strojem, H je čistý spád a η_c celková účinnost soustrojí. Vodní elektrárna využívá jako pohon vždy vodu, proto se součin čistého spádu a tíhového zrychlení nahrazuje veličinou zvanou měrná energie vody Y .

$$Y = H \cdot g \quad (J \cdot kg^{-1}; m; m \cdot s^{-2}) \quad (1.3)$$

Hustota vody je $1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ proto se vztah (1.2) upraví do podoby:

$$P = Y \cdot Q \cdot \eta_c \quad (kW; J \cdot kg^{-1}; m^3 \cdot s^{-1}; -) \quad (1.4)$$

Z tohoto vztahu jasně vyplývá, že výkon hydrodynamického zdroje (MVE) je úměrný především velikosti spádu (potažmo měrné energii vody) a průtoku strojem. Průtok je závislý na mohutnosti vodního zdroje, ročním období a úhrnnosti srážek a hraje jedno z hlavních kritérií pro návrh MVE.

Spád je daný geologickou polohou a často je vytvořen umělými jezy nebo derivacemi na vodním toku. Obecně je snaha vytvořit spád co největší, což teoreticky přináší větší energetický zisk. Rozlišuje se tzv. hrubý H_b a čistý spád H . Hrubý spád je definován jako výškový rozdíl horní a spodní hladiny.

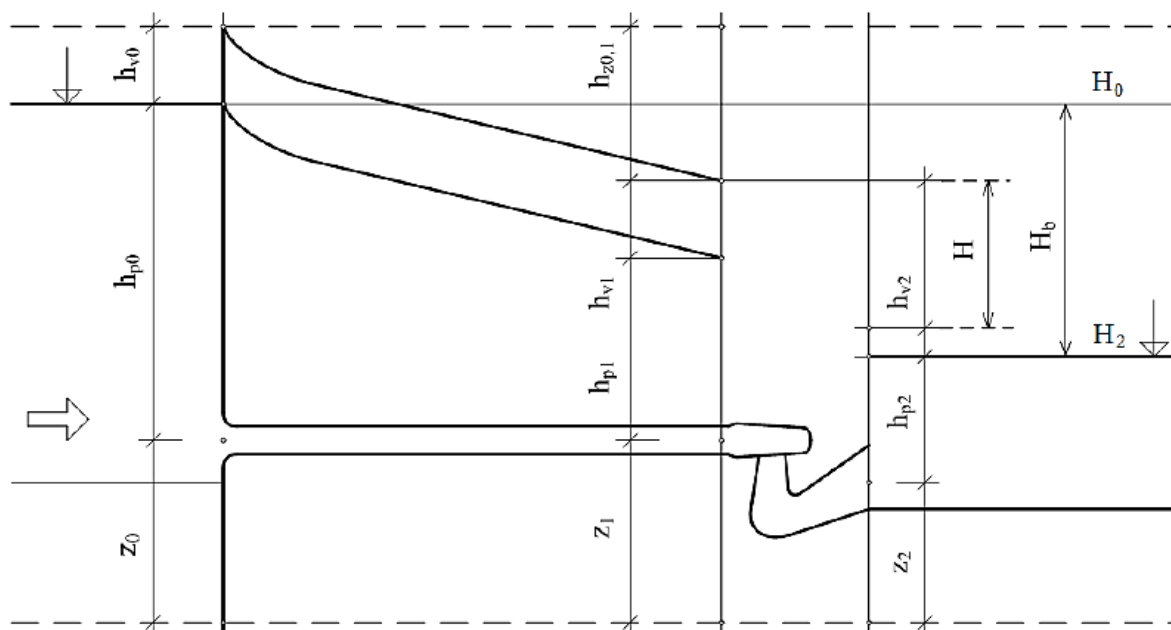
$$H_b = H_0 - H_2 \quad (m; m; m) \quad (1.5)$$

Celkový využitelný spád H_v MVE je

$$H_v = H_b + h_{v0} - h_{v2} = H_b + \frac{a_1 v_1^2 - a_2 v_2^2}{2g} \quad (m; m; m; -; m \cdot s^{-1}; m \cdot s^{-2}) \quad (1.6)$$

kde druhý člen rovnice představuje kinetický spád a a_1 , a_2 jsou tzv. Corioliovy koeficienty, které udávají míru nerovnoměrného rozložení rychlosti v profilu, které je zobrazeno v kapitole o čerpadlové turbíně (Obr. 1.8). Čistý spád H MVE je potom rozdíl využitelného spádu H_v a součtu všech hydraulických spádových ztrát h_{zi} . Ty vznikají ve vodních cestách k a od turbíny.

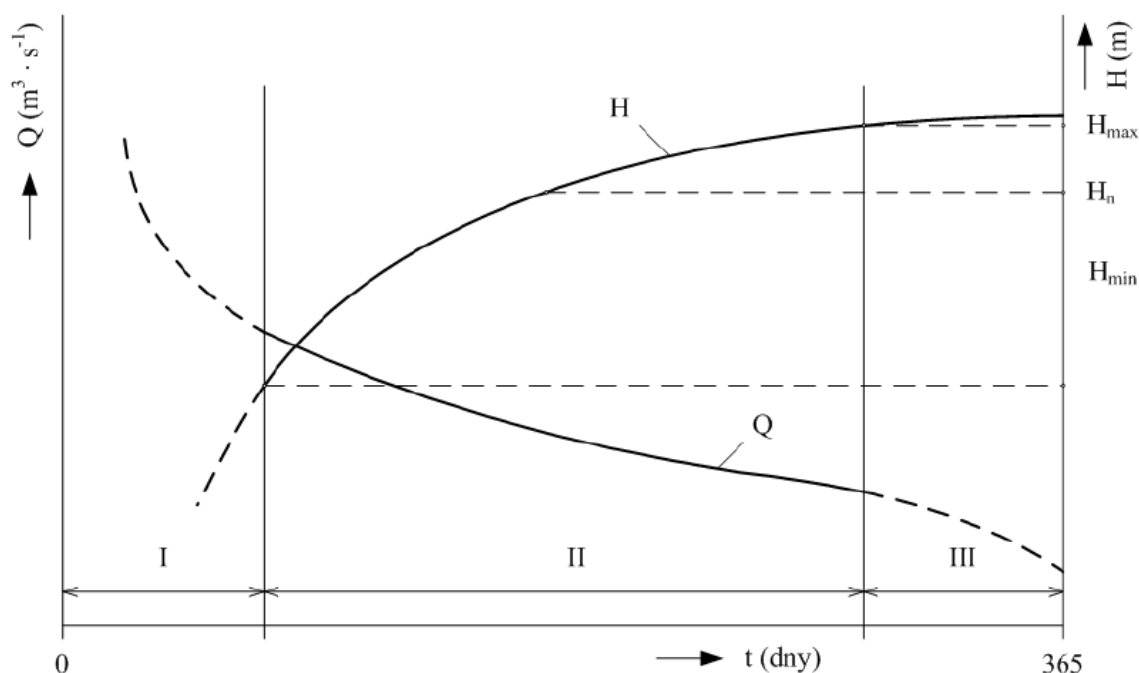
$$H = H_v - \sum h_{zi} = H_b + \frac{a_1 v_1^2 - a_2 v_2^2}{2g} - \sum h_{zi} \quad (m) \quad (1.7)$$



Obr. 1.1 Příklad situace velikosti hrubého a čistého spádu [4]

Velikosti spádů se však v průběhu roku také mohou měnit a tomu je třeba přizpůsobit návrh. Období, která mohou nastat se dělí na:

- Období nedostatku spádů a přebytku průtoků (I)
- Období dostatku spádů i průtoků (II)
- Období velkých spádů a nedostatku průtoků (III)



Obr. 1.2 Křivky překročení spádu a průtoku v závislosti na počtu dní v roce [4]

Obr. 1.2 ukazuje příklad rozložení těchto období v roce. Tyto závislosti je potřeba mít k dispozici při návrhu MVE, jsou důležité pro vhodnou volbu typu a počtu turbín a určení, do jaké míry bude MVE schopná efektivního provozu. [1], [3], [4], [5]

Pokud je v MVE instalována turbína, která je schopna efektivně pracovat v širokém rozmezí otáček, je možné tyto problémy v dnešní době řešit pomocí pokročilé řídicí techniky a tím kompenzovat kolísání spádů a průtoků.

1.2 Vodní turbíny

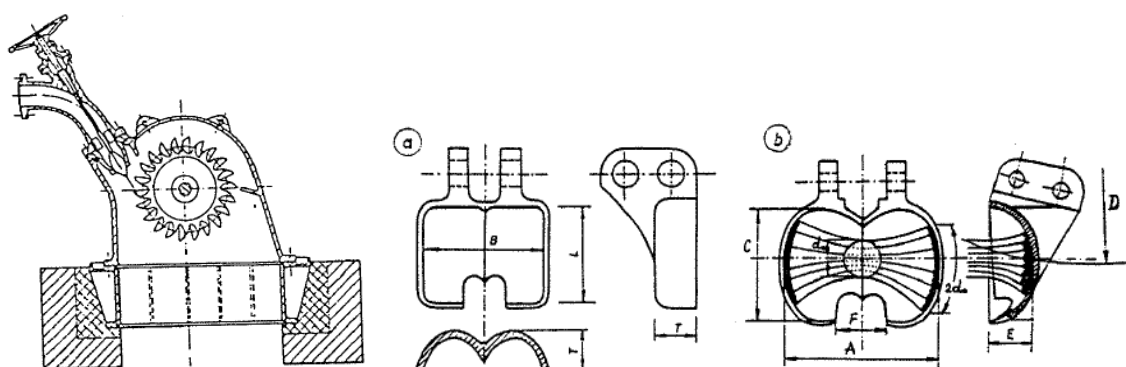
Vodní turbína je stejně jako vodní kolo rotační vodní motor přeměňující energii vody na energii mechanickou. Vývoj vodních turbín se odehrál hlavně v 19. století. Roku 1827 byla do provozu uvedena první přetlaková Burdinova turbína. Během zhruba stovky let vzniklo mnoho typů a návrhů turbín. V dnešní době se zdokonalují zejména použité materiály, aby se snížily náklady na výrobu, údržbu a prodloužila se životnost turbín. Dnes jsou nejrozšířenější 3 typy vodních turbín a to Francisova, Peltonova a Kaplanova. Všechny tyto typy dosahují vysokých účinností v rozmezí od 80 do až 96 % a jejich volba závisí převážně na spádových a průtokových poměrech v průběhu roku v daném místě stavby vodní elektrárny. V této kapitole budou popsány jen základní charakteristiky a popis turbín používaných u vodních elektráren, podrobně jsou turbíny rozebrány v literatuře [1], [3], [4], [5], [6], ze které jsem vycházel.

1.2.1 Peltonova turbína

Peltonova turbína spadá do kategorie rovnotlakých turbín, to znamená, že využívá kinetickou energii vody. Uspořádání soustrojí bývá nejčastěji s horizontální hřídelí. Počet vstříků může být 1 až 6, podle velikosti a výkonu turbíny.

Důležitou součástí soustrojí Peltonovy turbíny je právě tryska, která má zajišťovat celistvost vodního paprsku, jeho správné nasměrování a regulaci průtoku vody.

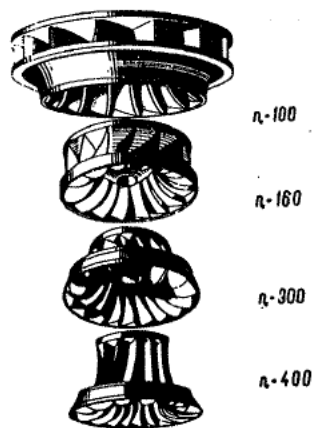
Oběžné kolo Peltonovy turbíny je tvořeno diskem kola, ke kterému jsou připevněny lopatky specifického tvaru a daného optimálního počtu. Jsou navrženy tak, aby byl maximálně využit paprsek vody. [1]



Obr. 1.3 Peltonova turbína a tvary lopatek a) válcovitá b) elipsoidická [1]

1.2.2 Francisova turbína

Francisova turbína spadá do kategorie přetlakových (reakčních) turbín. Tento typ turbín využívá tlakovou energii vody. Francisova turbína se využívá pro spády zhruba od 100 do 500 m. Tvar lopatek závisí na rychloběžnosti turbíny. [1]

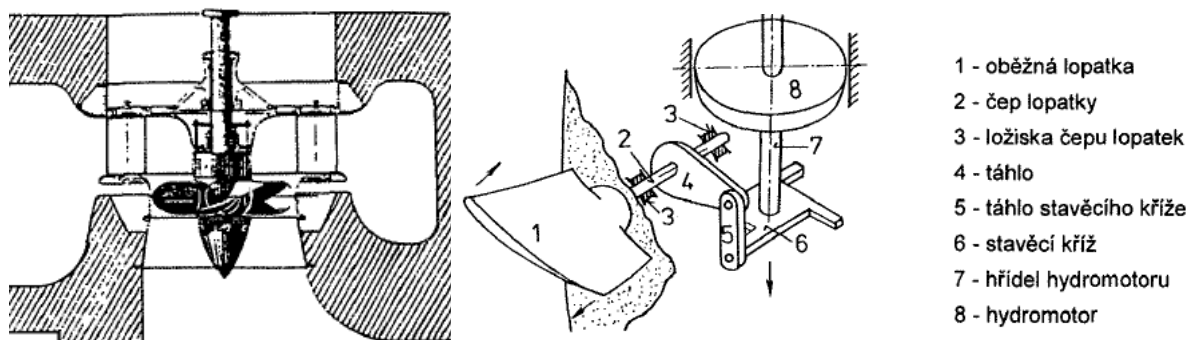


Obr. 1.4 Oběžné kolo Francisovy turbíny [1]

1.2.3 Vrtulová a Kaplanova turbína

Jedná se o přetlakové neboli reakční turbíny stejně jako turbíny Francisovy. Obecně se používají pro nižší spády. Vrtulové turbíny pracují s vysokou účinností pouze v úzkém okolí pracovního bodu, což omezuje její použití v místech s neustálými průtoky a spádovými poměry. Tento design byl vylepšen prof. Kaplanem.

Kaplanova turbína disponuje možností natáčet lopatky oběžného kola. To umožňuje práci s vysokou účinností v širokém rozmezí průtoků a spádů. Kaplanovy turbíny se vyznačují malým počtem lopatek – minimálně 3, maximálně 10, s rostoucím spádem roste jejich počet. [1]

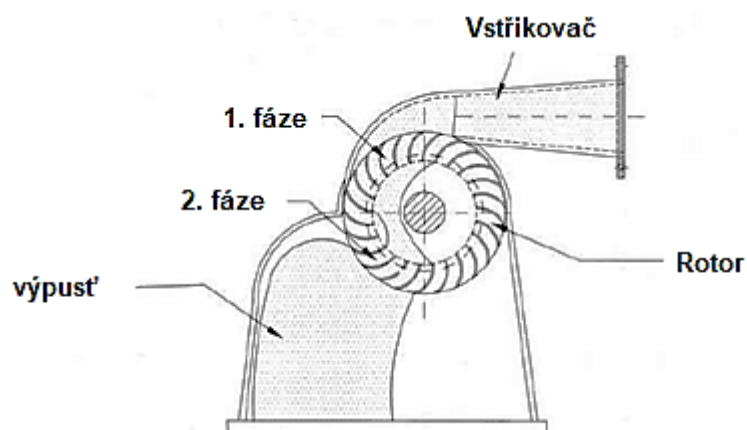


Obr. 1.5 Kaplanova turbína a zařízení pro natáčení lopatek [1]

1.2.4 Bánkiho turbína

Bánkiho turbína je speciální typ turbíny. Lopatky oběžného kola jsou protékány dvakrát, první průtok pracuje na přetlakovém principu (jako Francisova a vrtulová turbína) a druhý průtok na principu rovnotlakém (jako Peltonova turbína).

Voda je přiváděna a směřována na turbínu obdélníkovým snadno regulovatelným přiváděčem (vstřikovačem). Lopatky oběžného kola jsou tvarovány tak, aby byla dopadající voda směřována ke středu (první průtok, voda předá asi 79 % výkonu soustrojí). Voda dále dopadá na lopatky podruhé, předá zbylých 21 % výkonu soustrojí a volně vytéká pryč. Počet lopatek je obvykle 28-36. Velkou výhodou tohoto konceptu je, že ložiska nejsou ve vodě, tudíž lze turbínu použít i s pitnou vodou, dále je velmi odolná vůči abrazi a znečištění, je vhodná pro použití u malých spádů od 2 do 30 m a malých průtoků, rovněž jí nevadí běh bez zatížení a nevzniká na ní kavitace. Díky těmto vlastnostem je často instalována při rekonstrukcích MVE a při zřizování domácích vodních elektráren, i přes nižší účinnost okolo 80 %. [1], [7]

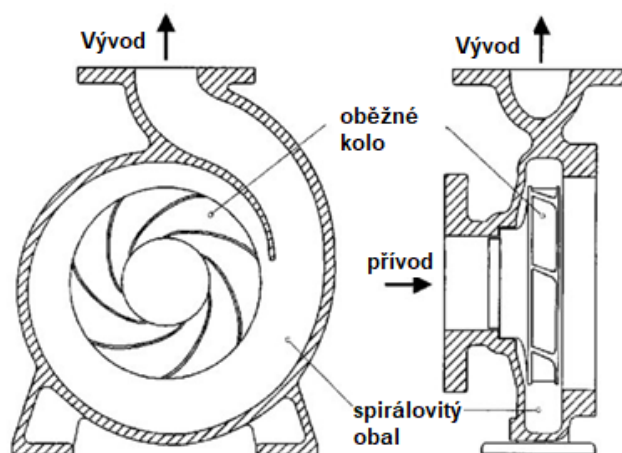


Obr. 1.6 Bánkiho turbína (upraveno) [7]

1.2.5 Odstředivá čerpadlová turbína

Odstředivé čerpadlové turbíny lze z pohledu, co se týče principu využití energie vody, zařadit do kategorie přetlakových turbín. Jelikož je tento typ turbíny použit v modelu MVE v laboratoři, chci se jí zabývat v této práci více dopodrobna. Je důležité porozumět charakteristikám odstředivého čerpadla užívaného jako turbína.

V posledních letech se začínají více uplatňovat mírně upravená odstředivá čerpadla nebo čerpadla bez jakékoliv speciální úpravy, která slouží pro pohon zejména mikro vodních elektráren o výkonu do několika desítek kW.



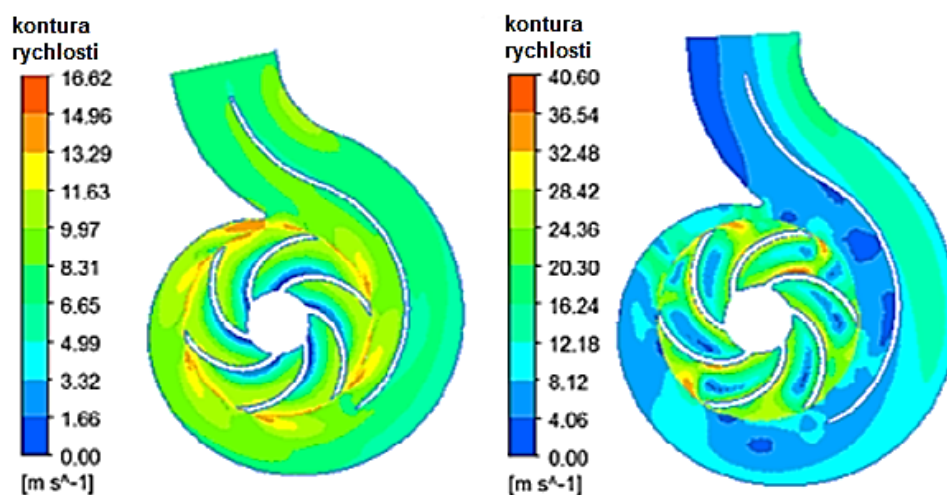
Obr. 1.7 Odstředivé čerpadlo (upraveno) [8]

Jejich výhodou je především v nízkých pořizovacích nákladech a nákladech na údržbu. V porovnání s konvenční vodní turbínou jsou pořizovací náklady asi desetinové. Další nespornou výhodou je chod při vysokých otáčkách, což umožňuje přímé bezpřevodové spojení s generátory. Je tím zvýšena účinnost celého soustrojí.

Myšlenka využít odstředivé čerpadla jako zdroj mechanické rotační energie, kterou můžeme využít k výrobě elektrické energie, se zrodila již před 80-90 lety, kdy byly položeny teoretické základy i provedeny různé experimenty. Větší pozornost si toto téma získalo až s rozvojem pokročilé výkonové elektroniky s možností vektorového řízení. Nicméně výzkum a rozvoj použití těchto čerpadlových turbín není zdaleka u konce. Většina výrobců udává zatěžovací charakteristiky tzv. performace curves pro čerpadlový režim. Přece jen hlavní úkol čerpadla je čerpat vodu. Proto je dnes důležitý úkol odhalit, jestli je možné nějakou univerzální metodou zjistit, jaké budou mít čerpadla vlastnosti a charakteristiky v turbínovém režimu.

Experimenty bylo dokázáno, že použití odstředivého čerpadla jako turbíny nepředstavuje nebezpečí z hlediska přetěžování materiálu, tudíž nedochází k předčasné degradaci a zkrácení životnosti čerpadla. [9]

Na obr. 1.8 si lze všimnout odlišného rozložení rychlosti proudící kapaliny při stejné hodnotě průtoku. Nejdůležitější poznatek je, že při čerpadlovém režimu je rozložení rychlosti rovnoměrné v celém tělese čerpadla, zatímco při turbínovém režimu je rozložení značně nerovnoměrné a nejvyšší rychlosti kapalina dosahuje právě na hranách lopatek oběžného kola. Přesně naopak jako u čerpadlového režimu. Tento jev má za příčinu snížení účinnosti při turbínovém chodu. [10]



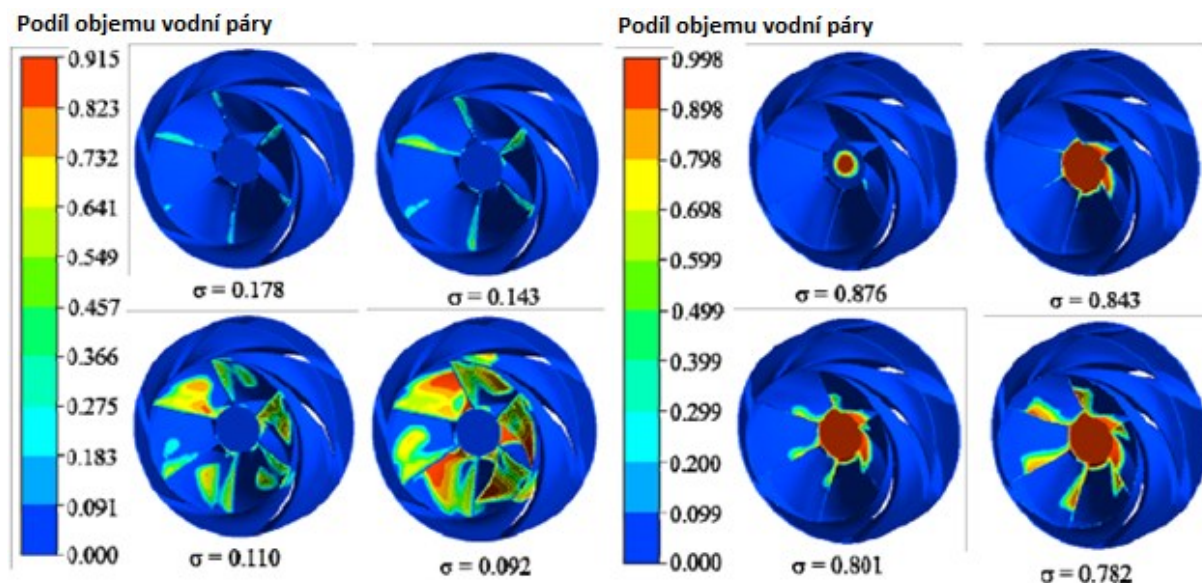
Obr. 1.8 Rozložení rychlosti při čerpádkovém (vlevo) a turbínovém (vpravo) režimu (upraveno) [10]

Pokles účinnosti u odstředivých čerpadel je při turbínovém chodu zhruba 5-10 %, což je stále velice přijatelná ztráta v porovnání s dostupností a náklady na takové zařízení. [10]

Další problém, na který je třeba brát ohled je kavitace. Kavitace je jev, při kterém se v kapalině tvoří bublinky plynu, vznikající při poklesu tlaku při obtékání těles v kapalině. V případě vody jde o bublinky vodní páry, která vzniká při poklesu pod hodnotu kavitačního tlaku. Bubliny následně prudce kondenzují na lopatkách oběžného kola, způsobují výrazné snížení účinnosti a po delším působení erozi materiálu a potenciální zničení zařízení. Kavitaci lze kvantifikovat tzv. kavitačním číslem K (jiné zdroje používají C_a nebo σ),

$$K = \frac{p - p_k}{\frac{1}{2} \rho v^2} \quad (-; pa; pa; kg \cdot m^{-3}; m \cdot s^{-1}) \quad (1.8)$$

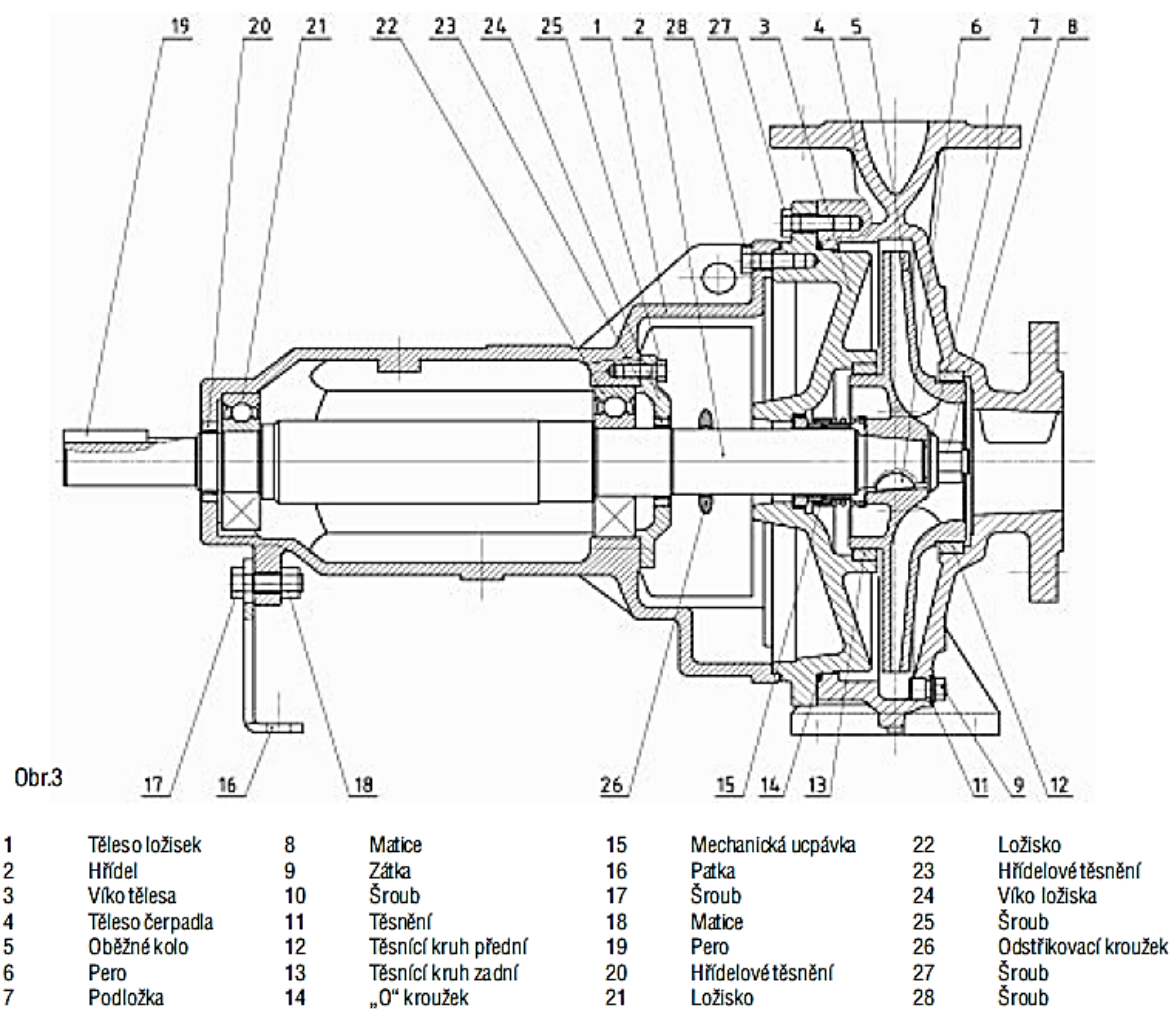
kde p je tlak okolní kapaliny, p_k je kritický neboli kavitační tlak, ρ je hustota kapaliny a v je rychlost proudící kapaliny. [11]



Obr. 1.9 Rozložení kavitace při čerpadlovém (vlevo) a turbínovém (vpravo) režimu (upraveno) [10]

Ze simulací a experimentů vyplývá, že při obou režimech se zvyšuje množství vodních výparů na oběžném kole se snižujícím se kavitačním číslem. U čerpadlového režimu se kavitace začíná objevovat na hranách lopatek v sací části oběžného kola a dále se rozšiřuje na celou plochu lopatek. U turbínového režimu se velice výrazná kavitace objevuje přímo ve středu oběžného kola a dále se rozšiřuje po hranách lopatek směrem ven vlivem odstředivých sil. Rozložení kavitace na lopatkách čerpadlové turbíny koresponduje s rozložením rychlosti proudící kapaliny, což potvrzuje, že kavitace je závislá na rychlosti proudění kapaliny. [10]

Různé vědecké studie dokazují obecné pravidlo, že čerpadlové turbíny dosahují v turbínovém režimu nejvyšší účinnosti při větších průtocích, spádech a otáčkách, oproti hodnotám těchto veličin pro čerpadlový režim. Maximální dosažitelná účinnost bývá o 5 až 10 % nižší než v čerpadlovém režimu, a to s průtoky a otáčkami 1,4 až 1,8krát většími.



Obr. 1.10 Řez odstředivým čerpadlem Sigma 40-NVE [12]

2 Výroba elektřiny v malých vodních elektrárnách

Pro generování elektřiny se u malých vodních elektráren nejčastěji využívá asynchronní generátor nebo synchronní generátor (obecně u vyšších výkonů). Jelikož laboratorní model MVE využívá asynchronní motor jako generátor a čerpadlo vytvářející spád vody pro turbínu je také poháněno asynchronním motorem, rozeberu v této kapitole oba režimy chodu AM a dále způsoby jeho řízení.

2.1 Asynchronní stroj

Asynchronní stroje se v průmyslu využívají více než sto let. Vývoj AS, hlavně díky pokročilým výpočetním metodám a dokonalejším materiálům, přinesl výrazné zvyšování účinnosti, odolnosti, zvyšování výkonu a snižování hmotnosti. Asynchronní motor je v současné době nejrozšířenějším a nejdostupnějším typem motoru.

Základní princip činnosti asynchronního motoru je založen na vzájemném elektromagnetickém působení točivého magnetického pole statoru a proudů vyvolaných ve vinutí rotoru tímto polem. Magnetický obvod je rozdělen úzkou vzduchovou mezerou pro zachování co nejlepší magnetické vazby. V případě 3f asynchronního motoru jsou jednotlivé fáze od sebe posunuty o 120° . Po připojení statorového vinutí na napájecí síť o frekvenci f (v ČR 50 Hz), dochází k vytvoření točivého magnetického pole, jehož rychlost závisí na frekvenci napájecí sítě a počtu pólů, respektive pólových dvojic stroje.

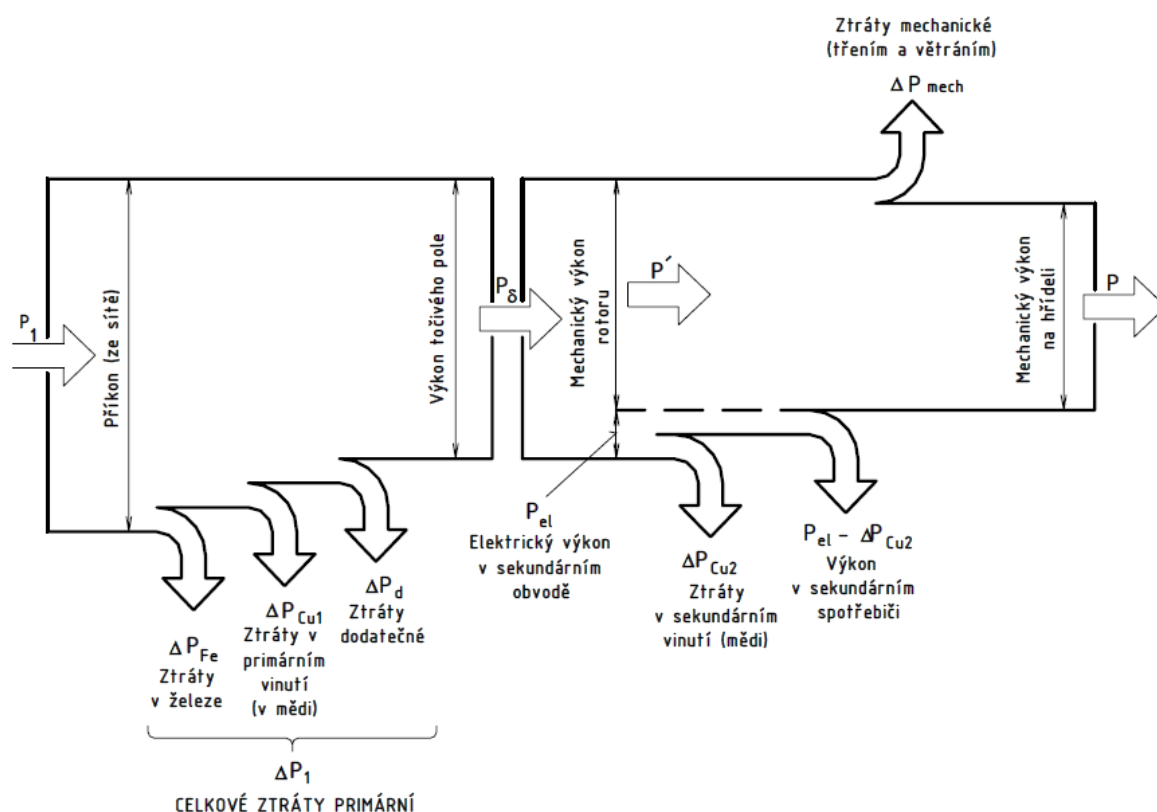
$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p} \quad (ot \cdot min^{-1}; Hz; -) \quad (2.1)$$

Kde n_s jsou otáčky statorového pole tzv. synchronní otáčky, f je frekvence napájecí sítě, p počet pólových dvojic. Indukční čáry tohoto statorového pole protínají vodiče rotorového vinutí, to vyvolá naindukování napětí v rotorovém vinutí a protékání proudu v rotorovém vinutí. Rotorový proud vytváří magnetické pole, které interaguje s magnetickým polem statorovým. V důsledku toho na rotor působí síla, která podle Lenzova zákona vychyluje vodiče rotorového vinutí ve směru otáčení statorového pole. Mezi statorovým a rotorovým magnetickým polem tedy vzniká relativní pohyb. Otáčky rotoru n jsou vždy menší než otáčky synchronní n_s . Tato skutečnost je popsána charakteristickou veličinou zvanou skluz s .

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (-; ot \cdot min^{-1}; ot \cdot min^{-1}; ot \cdot min^{-1}) \quad (2.2)$$

Při chodu asynchronního motoru naprázdno se otáčky stroje téměř rovnají otáčkám synchronním, stroj je zatížen pouze momentem, který vytváří hřídel motoru. Pokud začneme na hřídel působit momentem ve směru otáčení, otáčky rotoru budou vyšší, než jsou otáčky synchronní, skluz bude tedy záporný a motor plynule přejde do generátorického režimu. Aby se však AM do generátorického režimu dostal, potřebuje ještě zdroj magnetizačního proudu. Pokud je napájen přímo ze sítě, tak to nepředstavuje problém, stroj stále odebírá magnetizační proud, potažmo jalový výkon, stejně jako při motorickém chodu, ale dodává činný výkon do sítě. Při napájení z měniče frekvence (musí umožňovat rekuperaci), je dodávka magnetizačního proudu zajištěna právě měničem. Ze sítě potom není odebírán jalový výkon a je pouze dodáván činný výkon. [13], [14], [15], [16]

Pro pochopení toku výkonu asynchronním strojem je vhodné použít energetickou bilanci pro motorový (Obr. 2.1) a generátorický režim (Obr. 2.2).



Obr. 2.1 Výkonová bilance AM [14]

Činný výkon odebíraný z napájecí sítě je

$$P_1 = m_1 \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi \quad (W; -; V; A; -) \quad (2.3)$$

Kde m_1 je počet vinutí potažmo fází, U_1 statorové napětí, I_1 statorový proud a $\cos \varphi$ účinník motoru.

V primárním vinutí vznikají ztráty v mědi

$$\Delta P_{Cu1} = m_1 \cdot R_1 \cdot I_1^2 \quad (W; -; \Omega; A) \quad (2.4)$$

Kde R_1 je odpor statorového vinutí.

v železe

$$\Delta P_{Fe} = m_1 \cdot \frac{U_1^2}{R_{Fe}} \quad (W; -; V; \Omega) \quad (2.5)$$

Kde R_{Fe} je odpor magnetického obvodu.

a dodatečné ztráty P_d . Výkon ve vzduchové mezeře je tedy

$$P_\delta = P_1 - (\Delta P_{Cu1} + \Delta P_{Fe} + P_d) \quad (W) \quad (2.6)$$

Ztráty v rotoru jsou reprezentovány mechanickými ztrátami ΔP_{mech} a ztrátami v mědi rotoru ΔP_{Cu2} .

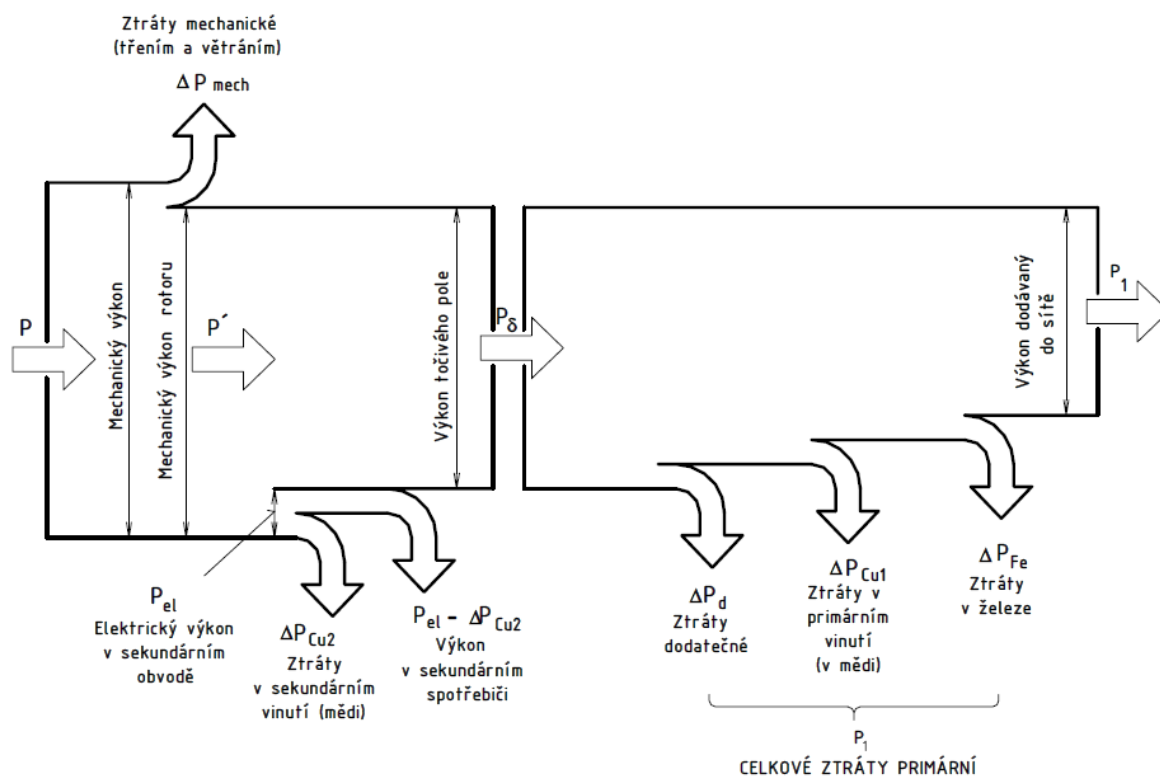
Užitečný výkon na hřídeli motoru je potom

$$P = P_\delta - (\Delta P_{Cu2} + \Delta P_{mech}) \quad (W) \quad (2.7)$$

Účinnost motoru je pak

$$\eta = \frac{P}{P_1} \quad (-; W) \quad (2.8)$$

Kde P je mechanický výkon na hřídeli motoru a P_1 příkon odebíraný motorem ze sítě. [14]



Obr. 2.2 Výkonová bilance AG [14]

Tok výkonu u asynchronního generátoru je obrácený oproti motoru. Výkon dodávaný na hřídel stroje musí hradit ztráty vzniklé v rotoru, statoru a výkon dodávaný spotřebičům. Účinnost je potom dána

$$\eta = \frac{P_1}{P} \quad (-; W) \quad (2.9)$$

Kde P je mechanický výkon na hřídeli motoru a P_1 příkon dodávaný motorem do sítě. [14]

Další možný a běžně využívaný režim AM je také brzdňý režim. Ten nastane tehdy, pokud změním smysl otáčení statorového pole vůči rotorovému. Nevýhodou tohoto režimu je, že se v rotoru vytvářejí velké proudy způsobující značné tepelné ztráty. [13], [14], [3]

Všechny tyto tři režimy jsou zobrazeny v následujícím obr. 2.3, který popisuje obecný průběh momentové charakteristiky asynchronního stroje, jejíž matematická interpretace je vyjádřena tzv. Klossovými vztahy:

$$\frac{M}{M_{zvr}} = \frac{2 \cdot s \cdot R'_2 \left(R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + X_\sigma^2} \right)}{(s \cdot R_1 + R'_2)^2 + (s \cdot X_\sigma)^2} \quad (\text{N} \cdot \text{m}; -; \Omega; \Omega) \quad (2.10)$$

Po úpravě:

$$\frac{M}{M_{zvr}} = \frac{2 \cdot (1 + \varepsilon)}{\frac{s}{s_{zvr}} + \frac{s_{zvr}}{s} + 2s}; \text{ kde } \varepsilon = \frac{R_1}{\sqrt{R_1^2 + X_\sigma^2}} \doteq \frac{R_1}{X_\sigma} \quad (2.11)$$

Pozn.: Velikost odporu statorového vinutí je v porovnání s velikostí magnetické reaktance zanedbatelná, proto je možno ε takto zjednodušit. Uvedené zjednodušení platí převážně pro jmenovitou napájecí frekvenci. Pokud dochází ke snižování napájecí frekvence (např. použití měničů) začíná hrát velikost statorového odporu větší vliv.

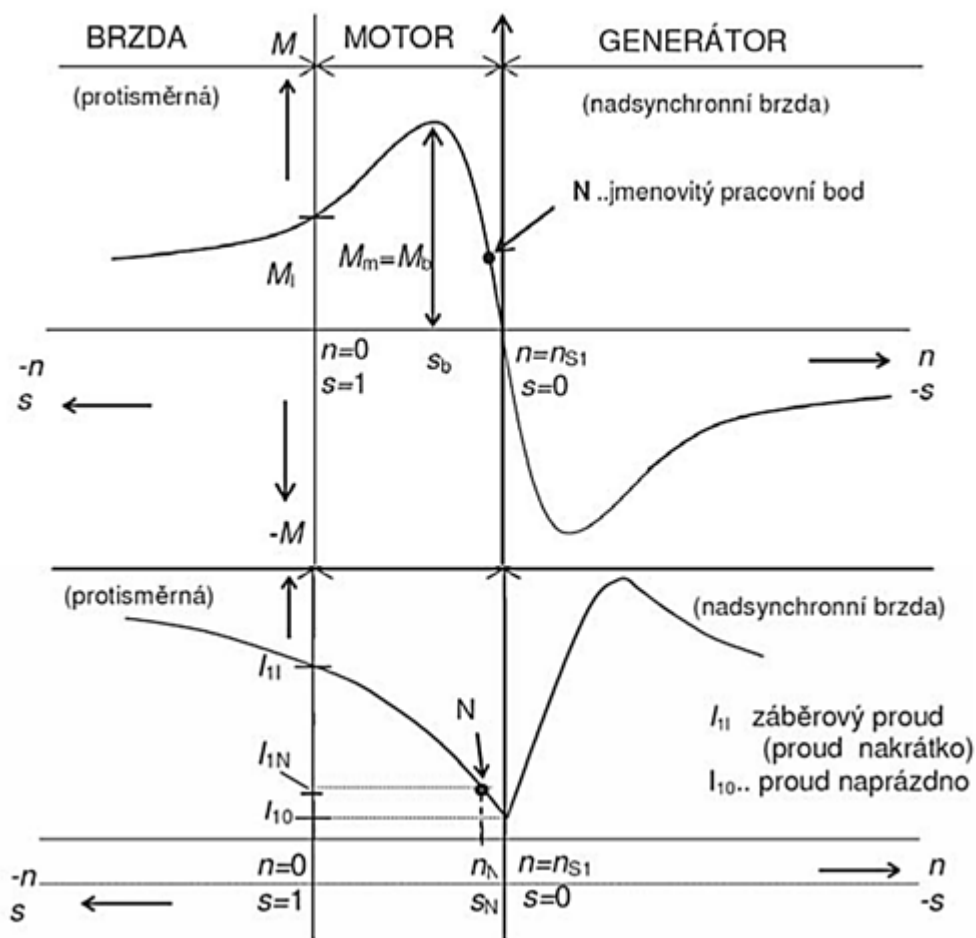
M představuje moment motoru, M_{zvr} moment zvratu, s skluz, s_{zvr} skluz zvratu, R'_2 je odpor rotorového vinutí, resp. klece nakrátko, přepočítaný na stranu statoru, R_1 je odpor statorového vinutí a X_σ rozptylová reaktance.

Jejichž vyjádření je blíže popsáno v [14]. Pokud zanedbáme odpor statorového vinutí, tak se rovnice zjednoduší na:

$$\frac{M}{M_{zvr}} = \frac{2}{\frac{s}{s_{zvr}} + \frac{s_{zvr}}{s}} \quad (2.12)$$

Pozn. M_{zvr} se také v jiné literatuře označuje jako M_{max} a s_{zvr} jako s_k (kritický moment).

Druhá část obr. 2.3 se zabývá průběhem proudu asynchronního stroje. Zajímavá je oblast (v generátorickém režimu), kdy se zvyšujícím se skluzem již neroste proud dodávaný do sítě, ale klesá. Tato oblast se již nachází v labilní oblasti a motor takto nelze trvale provozovat.



Obr. 2.3 Pracovní režimy asynchronního stroje [13]

2.2 Řízení otáček asynchronního motoru

Otáčky AM je možno řídit několika způsoby. Všechny vycházejí ze vztahu pro otáčky:

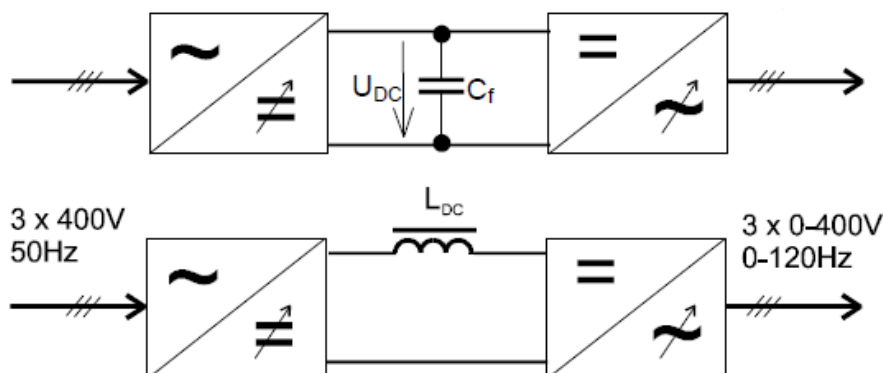
$$n = \frac{60 \cdot f_1}{p} (1 - s) \quad (\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}; \text{Hz}; -; -) \quad (2.13)$$

Kde n jsou otáčky rotoru, f_1 je frekvence napájecí sítě, p je počet pólových dvojic a s je skluz.

- řízení skluzu – zvětšení rotorového odporu, protinapětím v rotoru (jen u kroužkových motorů a nevýhodné), snížením napájecího napětí
- změna počtu pólů – pouze ve stupních, komplikované a neekonomické
- změna statorové (napájecí) frekvence – nutné použití měniče kmitočtu

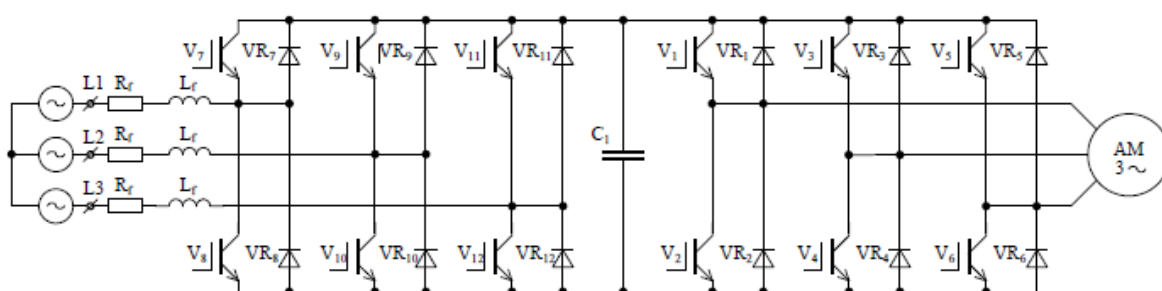
[14]

V dnešní době, díky rozvoji výkonové elektroniky a pokročilých řídicích metod, je řízení napájecí frekvence ten nejvýhodnější způsob. Tato metoda je nejčastěji realizována pomocí tzv. nepřímých měničů kmitočtu. Základní struktura je zobrazena na následujícím obr. 2.4.



Obr. 2.4 Blokové schéma nepřímého měniče kmitočtu napětového typu (nahore) a proudového typu (dole)(upraveno) [17]

Nepřímé měniče kmitočtu se obecně skládají ze vstupního usměrňovače (diodový, tyristorový nebo pulsní usměrňovač), stejnosměrného meziobvodu (napětový nebo proudový) a výstupního střídače (IGBT a unipolární tranzistory, GTO nebo IGCT). Poslední dobou se stále více používá právě pulsní usměrňovač, který umožňuje čtyřkvadrantní chod pohonu. Odběr proudu je také téměř sinusový, zvlnění proudu je velice malé (THDi se pohybuje okolo 10 %) a účinník se blíží jedné, nebo lze jeho hodnotu přímo nastavit. Pro správný chod však musí být na vstupu zapojeny síťové tlumivky. Typické uspořádání napětového měniče s pulsním usměrňovačem je zobrazeno na obr. 2.5. V podstatě se jedná o dva topologicky shodné měniče se stejnosměrným meziobvodem. Jeden měnič potom pracuje v usměrňovačovém režimu a druhý ve střídačovém. [17], [18], [19]



Obr. 2.5 Nepřímý měnič kmitočtu s napětovým pulsním usměrňovačem [20]

Pro řízení AM se potom využívají tři hlavní metody: skalární, vektorové a přímé řízení momentu. Skalární řízení je historicky nejstarší, spočívá v udržení konstantního magnetického toku Φ_m , to znamená, že je zapotřebí udržovat konstantní poměr napájecího napětí U a napájecí frekvence f .

$$\frac{U}{f} = konst. \quad (2.14)$$

Problém nastává při nízké napájecí frekvenci, kde je potřeba kompenzovat úbytek napětí na statorovém odporu a při frekvenci vyšší, než je jmenovitá frekvence motoru, protože dále není možné zvyšovat napájecí napětí. Tento způsob řízení je jednoduchý, ale není příliš vhodný pro dynamické aplikace.

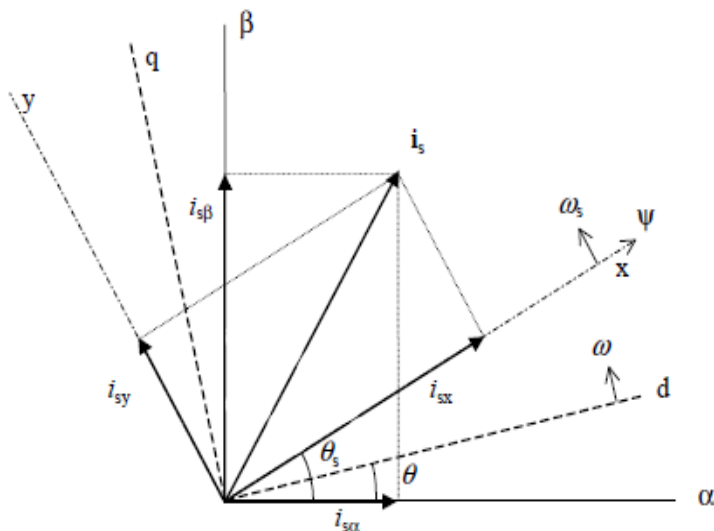
Vektorové řízení disponuje mnohem větší dynamikou a přesností. Spočívá v odděleném řízení magnetizační i_{sx} a momentotvorné i_{sy} složky proudu, je zde jistá analogie se stejnosměrnými pohony. Tyto proudy jsou zjišťovány pomocí matematického (proudového nebo napěťového) modelu stroje. Je zde použito Parkových transformací T 3/2. Trojfázová soustava se převede na ekvivalentní dvojfázovou pomocí prostorových vektorů. Princip vychází z rovnice pro asynchronní motor:

$$M = K(\psi_\alpha i_{s\beta} - \psi_\beta i_{s\alpha}) = K(\psi_x i_{sy} - \psi_y i_{sx}) \quad (2.15)$$

kde K je konstanta motoru. Pokud $\psi_y = 0$ (podle obr. 2.6), tak moment

$$M = K\psi_x i_{sy} \quad (2.16)$$

což je právě vztah analogický pro moment stejnosměrného motoru s cizím buzením.

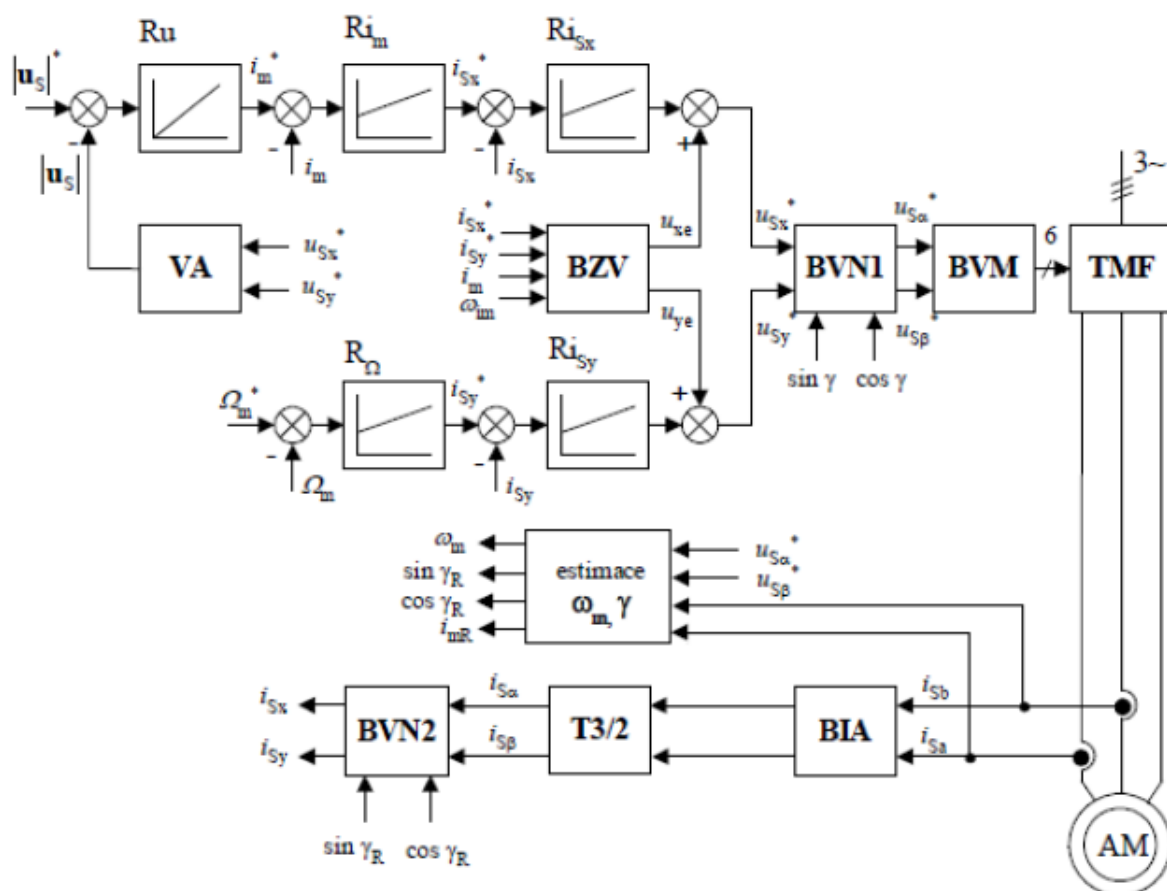


Obr. 2.6 Zobrazení prostorového vektoru proudu v souřadných soustavách [21]

Metoda přímého řízení momentu je založena na výběru spínacího vektoru měniče podle požadované hodnoty magnetického toku a momentu motoru. Určení těchto vektorů vyžaduje měření statorového napětí a proudu a přesný matematický model asynchronního stroje. [21], [22]

U moderních MVE se často využívá způsobu řízení bez snímače otáček. Jelikož pro řízení modelu MVE je použito vektorové řízení, tak obecná struktura tohoto způsobu řízení AM je zobrazena na následujícím obr. 2.7.

Pozn.: Skutečná struktura vektorového řízení SINAMICS S120 se může lišit. Obr. 2.7 slouží pro přiblížení představy složení struktury vektorového řízení AM bez snímače otáček.



Obr. 2.7 Regulační struktura vektorového řízení AM bez snímače otáček [22]

3 Model malé vodní elektrárny v laboratoři FEI

V roce 2014 byl firmou Sigma Hranice pro fakultu elektrotechniky a informatiky na VŠB-TUO zkonstruován model malé vodní elektrárny sloužící pro výzkum a vývoj pokročilých metod řízení elektrických pohonů.

3.1 Popis modelu MVE a stávající topologie

Jedná se o uzavřený cirkulační systém. Základními prvky modelu jsou dva strojní agregáty stávající se z asynchronních motorů a průmyslových odstředivých čerpadel (podrobnější popis viz. níže). První motor slouží k vytvoření průtoku vody a simulovaného spádu v systému, pro pohon druhého agregátu, který má funkci turbíny s generátorem. Hlavní část hydraulického okruhu spojuje čerpadlo s turbínou. V této části je umístěn průtokoměr a dva tlakoměry, za výstupem čerpadla a před vstupem do turbíny. Tato část reprezentuje reálné přívodní potrubí pro čerpadlovou turbínu MVE. K hlavní části okruhu je také připojena expanzní nádrž Refix o objemu 80 l natlakovaná na 0,7 MPa, aby nedocházelo vlivem rychle proudící kapaliny, potažmo úbytkem tlaku, ke kavitaci na oběžných kolech čerpadla a turbíny. Vliv kavitace byl popsán v kapitole 1.2.5 Odstředivá čerpadlová turbína. Další důležitý prvek je tlakoměr umístěný na výstupu turbíny (odečtením hodnoty tlaku před a za turbínou dokážeme určit spád). Výstup turbíny je spojen se vstupní částí čerpadla vratným (zpátečním) potrubím. Hlavní (přívodní) a zpáteční potrubí jsou propojeny tzv. bypassem, který slouží pro odvedení části vody z turbíny a tím jemné regulaci průtoku. Jelikož řízení obou motorů je zprostředkováno pomocí frekvenčního měniče, není zapotřebí použití bypassu a šoupátko zůstává permanentně zavřené. Obr. 3.1 zobrazuje model MVE.

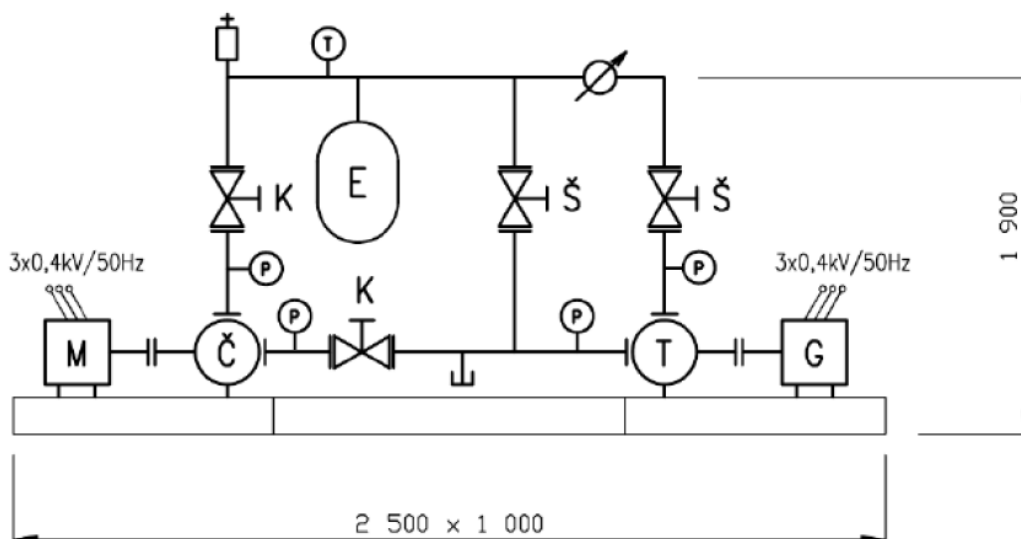
Potrubí má vnitřní průměr 80 mm (DN 80). Změřil jsem délku celého potrubí a vypočítal přibližný objem vody, který cirkuluje v systému. Přibližný objem vody činí zhruba 30 l, což je velice malé množství vody a při delším provozu modelu se voda začne výrazně zahřívat, a to může způsobit nepřesnosti při měření.

Tlakoměry instalované na modelu MVE jsou pouze ručičkové analogové (měřicí rozsah 0 - 1,6 MPa), Průtokoměr je digitální, ale informace o aktuálním průtoku je jen zobrazována na displeji a není použita jako zpětnovazební signál pro řídicí systém modelu. Jeho další nevýhoda je, že pro jeho použití bylo nutné zúžit potrubí na 50 mm (DN 50). Dochází tím k větším hydraulickým ztrátám v systému a větším nepřesnostem měření. Měření je proto velice nepraktické, zdlouhavé, nepřesné a vyžaduje koordinaci nejlépe tří osob.



Obr. 3.1 Fotografie modelu MVE

Oba motory jsou klasické asynchronní motory s kotvou na krátko značky Siemens z řady 1LE1, třídy IE2. První motor je dvoupólový s výkonem 11 kW, je mechanicky bezpřevodově spojen spojkou s odstředivým čerpadlem firmy Sigma model 40-NVE-200-7. Druhý motor je čtyřpólový se stejnou spojkou a stejným čerpadlem.



Obr. 3.2 Hydraulické schéma modelu MVE [3]

Tabulka 3.1 Šítkové hodnoty motorů

Parametry	Asynchronní motor pracující v motorickém režimu (zapojen do hvězdy)	Asynchronní motor pracující v generátorickém režimu (zapojen do hvězdy)
T_{yp}	1LE1	1LE1
P_n	11 kW	4 kW
U_n	400 V	400 V
f_n	50 Hz	50 Hz
I_n	20,5 A	8,2 A
$\cos(\varphi)$	0,87	0,81
n_n	2955 ot·min ⁻¹	1460 ot·min ⁻¹

Tabulka 3.2 Šítkové hodnoty čerpadel

Parametry	Čerpadlo	Čerpadlová turbína
T_{yp}	40-NVE-200-7-LZ-S	40-NVE-200-LZ-S
Q_r	10 l·s ⁻¹	6 l·s ⁻¹
H_r	45 m	15 m
n_r	2900 l·min ⁻¹	1440 l·min ⁻¹
P	7,5 kW	1,5 kW
m	48 kg	48 kg

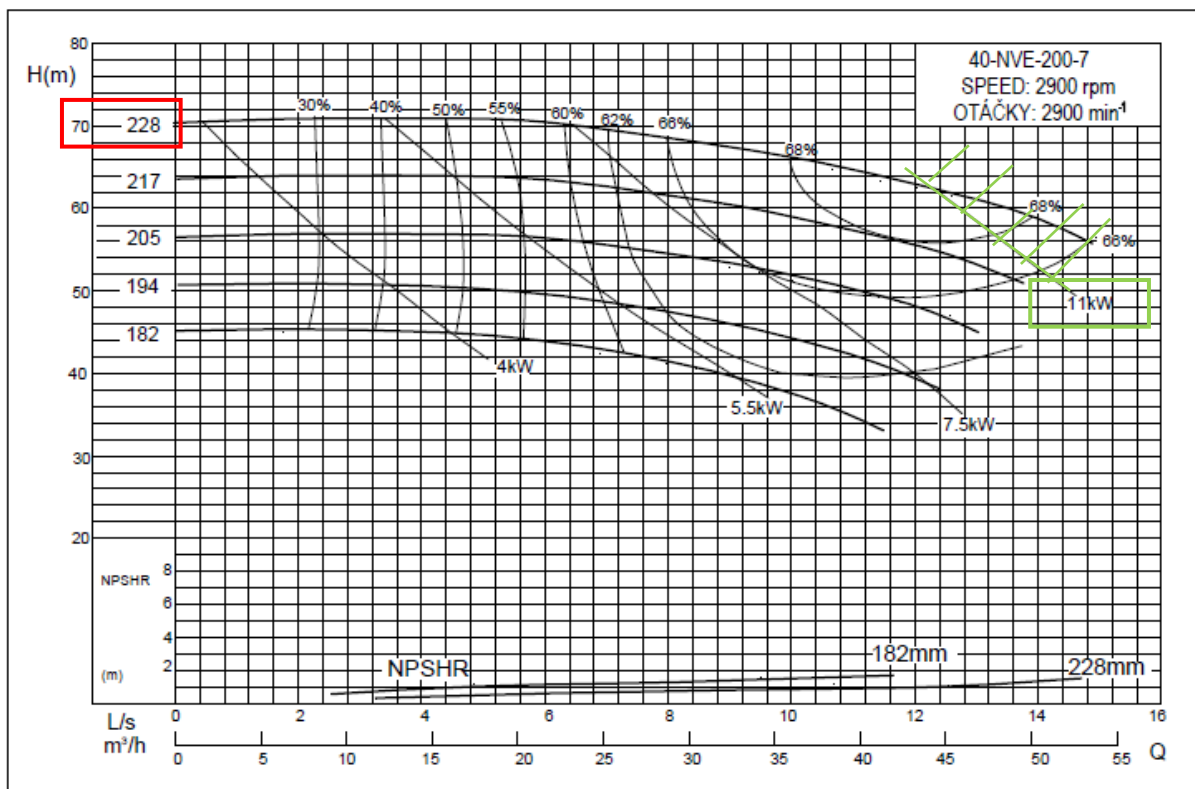
Jelikož průměry oběžných kol čerpadel nebyly známy, bylo je třeba zjistit měřením, aby se dalo určit, jaká charakteristika je pro čerpadla výchozí. Ověření spočívalo v tom, že se zastavil ventil na výstupu čerpadla, otáčky motoru se zvyšovaly až na jmenovité otáčky čerpadel. Na tlakoměrech byl vidět nárůst tlaku. Dle následující rovnice (3.1) jsem vypočítal odpovídající výtlačnou výšku čerpadla při nulovém průtoku, což nám dalo výchozí bod na charakteristice čerpadla. Z té lze vyčíst účinnost při daném průtoku a velikost pohonu potřebného pro konkrétní čerpadlo.

$$H = \frac{p_1 - p_2}{g \cdot \rho} \quad (\text{m; pa; m} \cdot \text{s}^{-2}; \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}) \quad (3.1)$$

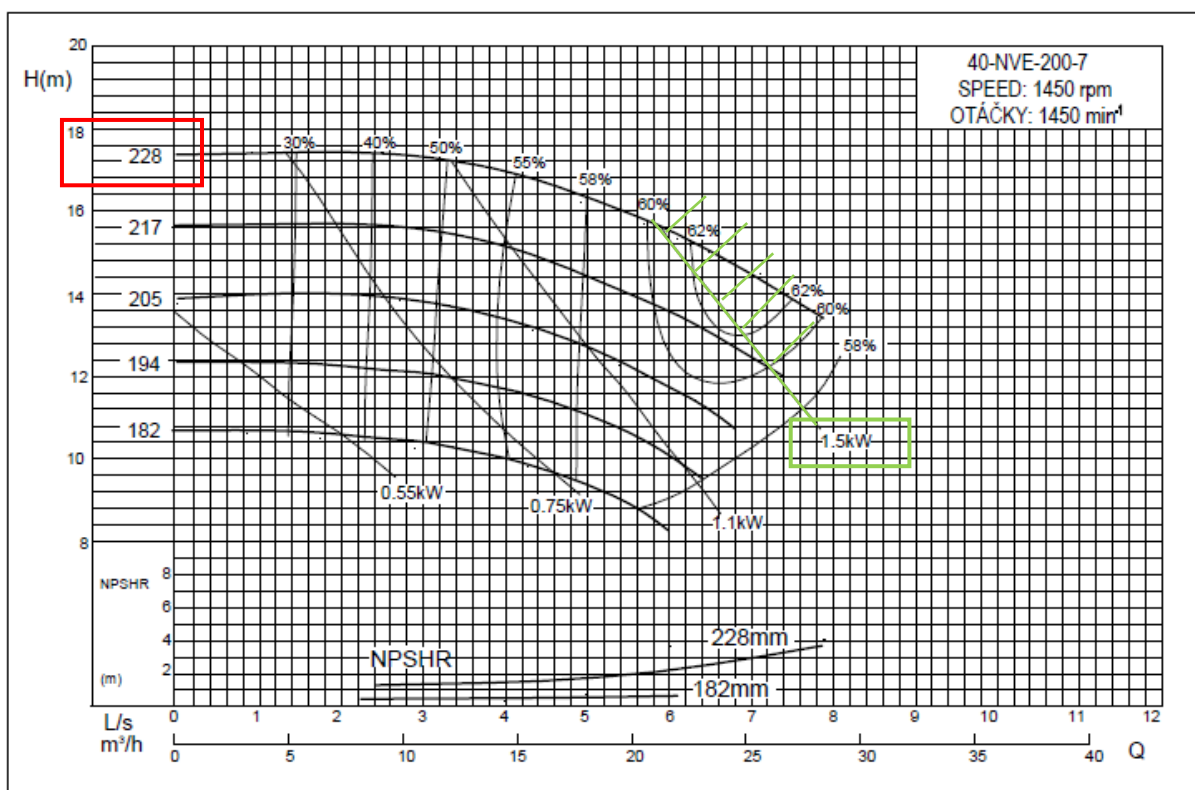
H je výška spádu, p_1 tlak před turbínou, p_2 tlak za turbínou, g gravitační zrychlení a ρ je hustota vody.

$$H_{1450} = \frac{p_1 - p_2}{g \cdot \rho} = \frac{(0,87 - 0,7) \cdot 10^6}{9,81 \cdot 10^3} = 17,3 \text{ m} \quad (3.2)$$

$$H_{2900} = \frac{p_1 - p_2}{g \cdot \rho} = \frac{(1,4 - 0,7) \cdot 10^6}{9,81 \cdot 10^3} = 71,4 \text{ m} \quad (3.3)$$



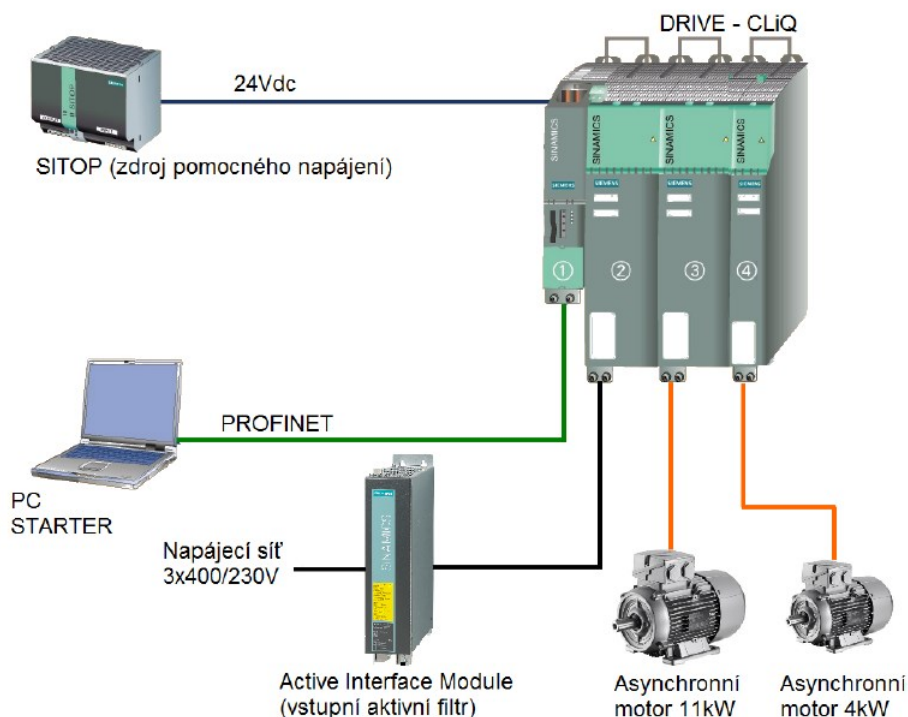
Obr. 3.3 Výkonnostní křivka čerpadla NVE 2900 ot·min⁻¹ (upraveno) [23]



Obr. 3.4 Výkonnostní křivka čerpadla NVE 1450 ot·min⁻¹ (upraveno) [23]

Tímto měřením jsem zjistil, že obě čerpadla mají průměr oběžného kola 228 mm. Jejich konstrukce je identická, rozdíl výkonu je dán právě volbou motoru. Díky použitým pohonům může první čerpadlo dosáhnout účinnosti 68 %. Druhé čerpadlo má účinnost při jmenovitých otáčkách 62 %. Daná výkonnostní oblast čerpadel je vyznačena zeleně na obr. 3.3 a obr. 3.4. Díky poznatkům ze studií o čerpadlových turbínách předpokládám, že maximální účinnost čerpadla 40-NVE-200-7 bude v rozmezí od 52 % do 58 %.

Topologie pohonů modelu MVE, která je momentálně používána je zobrazena na obr. 3.5 a její složení a vlastnosti jsou popsány níže.



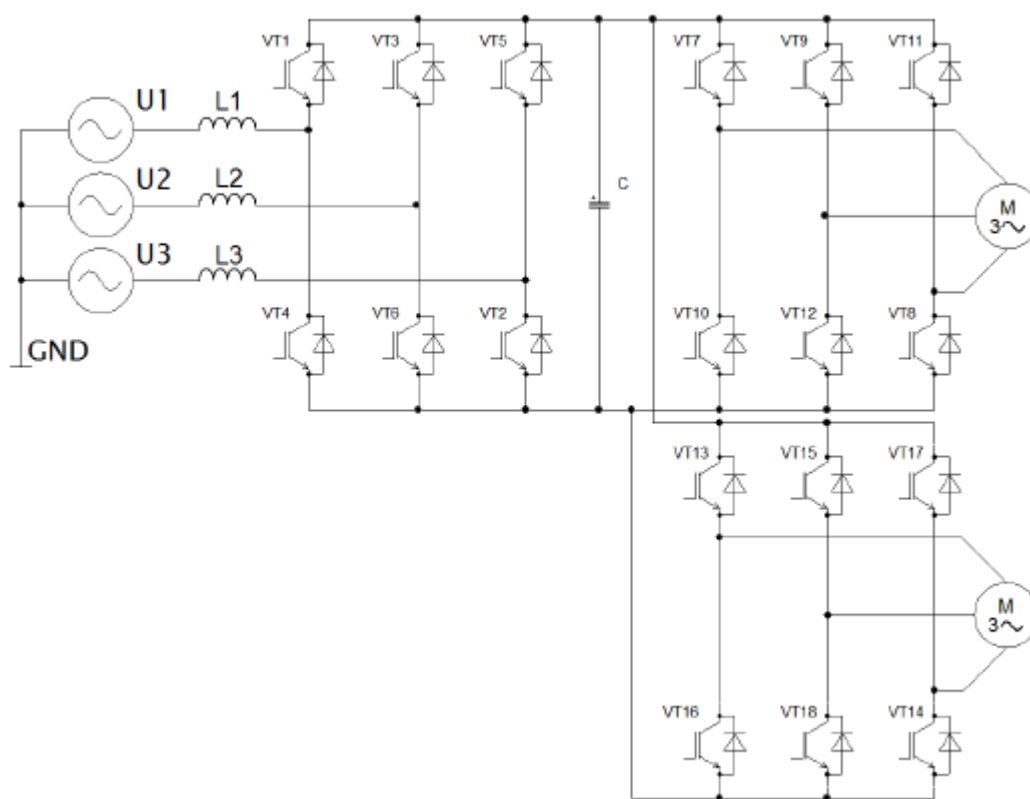
Obr. 3.5 Současná topologie zapojení pohonů MVE [24]

Tabulka 3.3 Komponenty Siemens [24]

1	CU320-2 PN	-
2	Active Line Module	$P_n = 16 \text{ kW}$, $I_n = 27 \text{ A}$, $U_{DC} = 600 \text{ V}$
3	Single Motor Module	$P_n = 15 \text{ kW}$, $I_n = 30 \text{ A}$
4	Single Motor Module	$P_n = 7.5 \text{ kW}$, $I_n = 18 \text{ A}$

Pro řízení motorů jsou použity komponenty SINAMICS S120, jimiž se dopodrobna zabývá Bc. Marek Schmidt [24]. Sestava se skládá z řídicí jednotky Control Unit CU320-2 PN, pulsního usměrňovače Active Line Module (ALM) se vstupním filtrem Active Interface Module (AIM) a dvou nepřímých měničů kmitočtu Single Motor Module (SMM). Napájení řídicích a pomocných obvodů je zprostředkováno zdrojem SITOP 24 V DC. Řídicí jednotka komunikuje po sběrnici PROFINET

s nadřazeným PC se softwarem STARTER a komunikace řídicí jednotky s ostatními moduly je zajištěna sběrnicí DRIVE-CLiQ. Single Motor Moduly jsou připojeny ke společnému stejnosměrnému meziobvodu 510-720 V. Orientační schéma zapojení na obrázku níže.



Obr. 3.6 Schéma zapojení výkonové části pohonů MVE [24]

Současná topologie má takovou vlastnost, že pokud některý z motorů přejde do generátorického režimu (v tomto případě motor 4 kW), tak střídač, ze kterého je motor napájen, přejde do usměrňovačového režimu a dokáže vyrobenou energii vracet do stejnosměrného obvodu a druhý motor ji spotřebuje. V průmyslových aplikacích, kde je použito více motorů zároveň a jejich chod má velkou dynamiku, je to nesporná výhoda, protože se sníží odběr ze sítě a není potřeba brzdných odporů. Nevýhoda takového zapojení je to, že pomocí softwaru STARTER lze přímo ovládat jen jeden motor. Proto byl pro motor 11 kW vytvořen ovládací panel, kterým lze řídit jeho otáčky, a motor 4 kW je potom ovládán pomocí PC. Tuto problematiku řešil Bc. Marek Schmidt [24] ve své diplomové práci.

Pro simulaci chodu MVE však tato topologie není vhodná. Bylo by daleko vhodnější mít k dispozici dva nezávislé frekvenční měniče. Měnič pro motor 4 kW musí umožňovat rekuperaci a bude pracovat výhradně v rekuperačním režimu. Další výhodou by byla možnost k tomuto měniči připojit akumulátor. V takovémto případě by na laboratorním modelu MVE bylo možné simulovat zdroj elektrické energie (mikro vodní elektrárna) například pro domácnost, která není připojena

k distribuční síti (off-grid systém), nebo k ní připojena je a dokáže přejít do ostrovního režimu, anebo dokonce přebytečnou vyrobenou elektřinu dodávat do sítě. Další vylepšení tohoto modelu spočívá v nalezení vhodného typu tlakoměru a průtokoměru, kterými bude možno nahradit stávající prvky pro možné elektronické zpracování měřených údajů.

3.2 Měření na modelu MVE

Bylo provedeno několik sérií měření na modelu MVE. První měření bylo již popsáno v předchozí kapitole 3.1, jímž byly zjištěny průměry oběžných kol obou čerpadel.

Dále byla ověřena charakteristika čerpadlové turbíny pro mezní stavy (tzn. nezatížený generátor a nulové otáčky generátoru) a pro jmenovité otáčky motoru 4 kW. Tato charakteristika zobrazuje závislost průtoku na měrné energii vody. Vztah (1.3) pro výpočet měrné energie vody bylo nutné upravit na:

$$Y = \frac{\Delta p}{\rho} \quad (\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}; \text{Pa}; \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}) \quad (3.4)$$

Při měření byly zaznamenávány hodnoty tlaků před a za turbínou a průtok systémem.

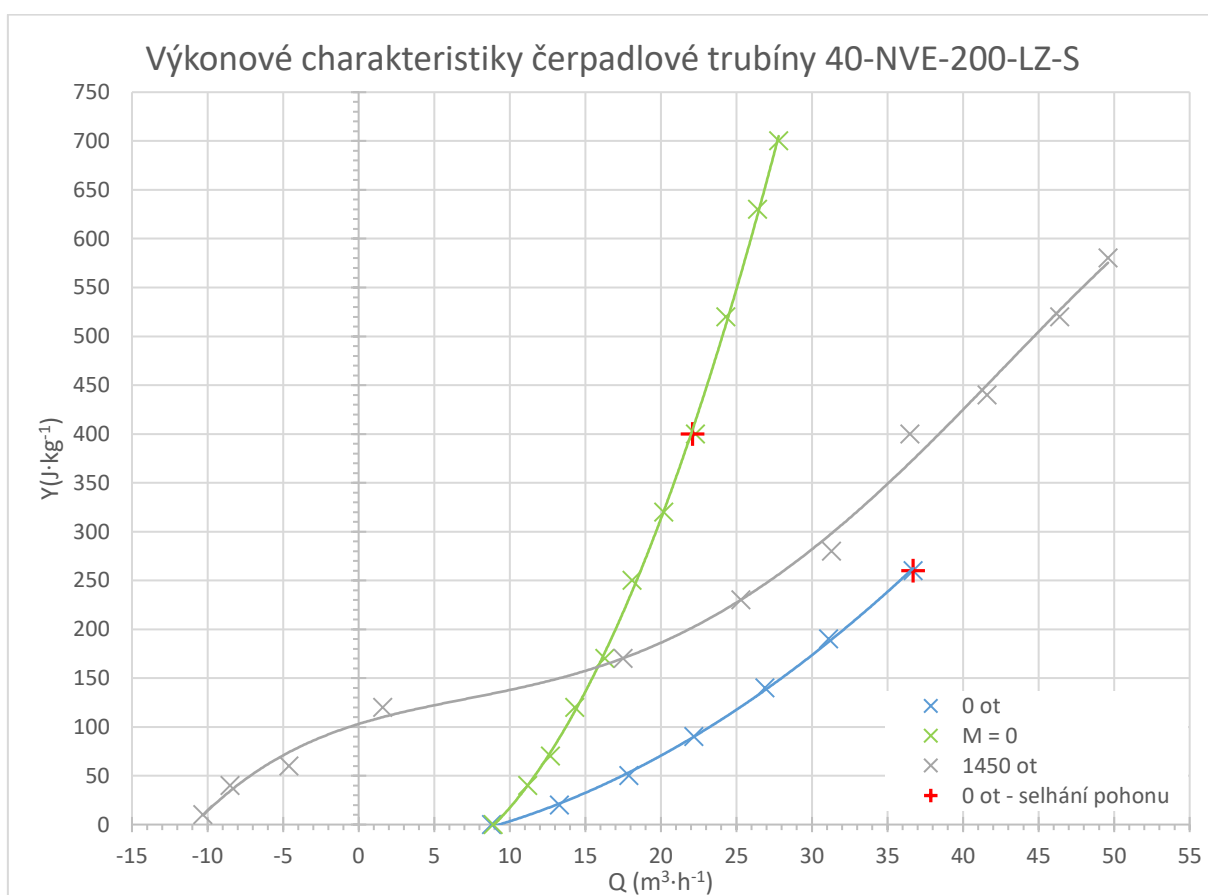
V první fázi nebyl generátor zapojen a čerpadlová turbína se točila naprázdno.

V druhé fázi se v programu STARTER nastavila požadovaná hodnota otáček generátoru na 0. Křivka nulových otáček však není kompletní, jelikož při průtoku okolo $40 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ a měrné energii větší než $270 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ došlo k selhání pohonu, SMM již nebyl schopen udržet motor zabrzděný a hřídel se začala otáčet stejnou rychlostí jako by motor nebyl vůbec připojen. Část charakteristiky pro nulové otáčky by od tohoto okamžiku kopírovala křivku $M = 0$ (pro názornost je na obr. 3.7 vyznačen tento zlom červenými kříži).

Ve třetí fázi byly poté nastaveny otáčky motoru 4 kW na jeho jmenovité otáčky a otáčky motoru 11 kW se postupně zvyšovaly po $250 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$, jako u všech ostatních měření, až do jeho jmenovitých otáček. Z výsledků je patrné, že motor 4 kW s touto turbínou (při svých jmenovitých otáčkách) je možno použít pro generování elektrické energie při průtocích vyšších než $16 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ a měrné energii $160 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$. V tomto stavu je na hřídel vyvíjen dostatečný moment a motor přechází do generátorického režimu. Tato situace nastává ve chvíli, kdy křivka pro 1450 otáček protne křivku nulového momentu.

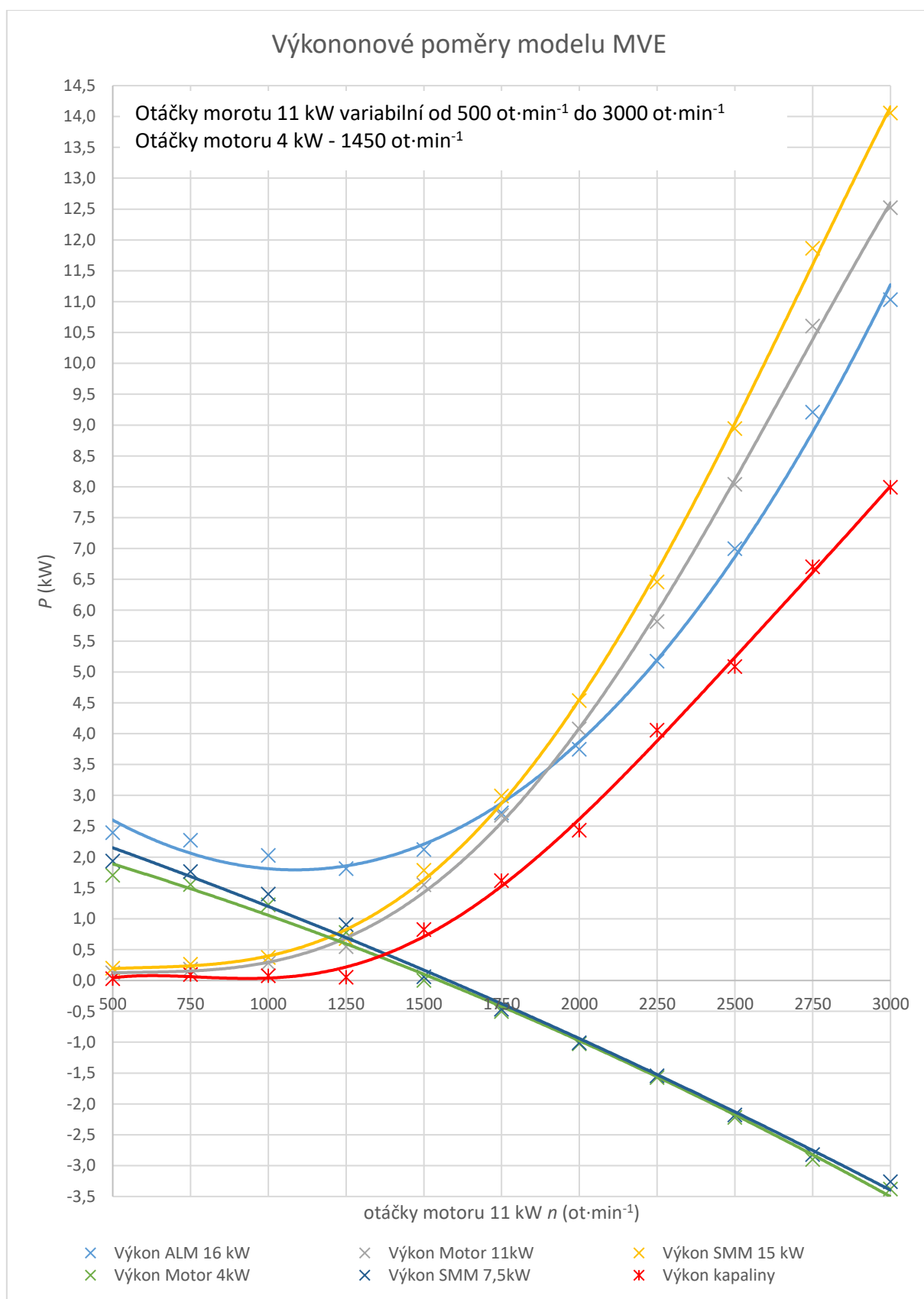
Výsledné křivky ukazují, v jaké oblasti průtoků a spádů je čerpadlo 40-NVE-200-LZ-S schopno pracovat jako turbína. Pracovní oblast je vymezena křivkami nulového momentu a nulových otáček.

K zajímavému jevu docházelo při malých otáčkách nastavovaných pro motor 11 kW, kdy měl průtok systémem opačný smysl, protože v těchto situacích se motor 4 kW nechoval jako generátor, ale místo toho čerpal vodu opačným směrem, a proto měl průtok opačný směr, než bylo původně zamýšleno. Tento stav je naprosto nežádoucí, ale dává nám dobré povědomí o tom, jaký musí být poměr otáček obou motorů, aby byl model MVE provozován v takových režimech, na které byl navrhován. Z této části měření vyplývá, že otáčky motoru 11 kW musí být vždy větší než otáčky motoru 4 kW, aby nedocházelo k tomuto stavu a bylo možné začít generovat energii. Tato skutečnost je také podložena tím, že konstrukce a velikost obou čerpadel je totožná. Přechod motorického režimu na generátorický je potom velice dobře patrný na obr. 3.8, kde jsou měřené výkony vztaženy právě k otáčkám motoru 11 kW.



Obr. 3.7 Výkonové charakteristiky turbíny

Další měření se týkalo zjištění výkonových poměrů v celém systému. Byly tedy změřeny hodnoty vstupního výkonu pulsního usměrňovače ALM, střídače SMM 15 kW a SMM 7,5 kW, výkon na motoru 11 kW a 4 kW a z hodnot průtoku a tlaku byl vypočítán mechanický výkon kapaliny. Toto bylo provedeno při různých nastaveních otáček a vyneseny grafy zobrazující závislosti mezi těmito veličinami.



Obr. 3.8 Výkonové poměry modelu MVE

Obr. 3.8 názorně přibližuje výkonové poměry panující v systému. V tomto případě byly opět nastaveny otáčky motoru 4 kW na hodnotu 1450 ot·min⁻¹ a otáčky motoru 11 kW se postupně zvyšovaly. Samotný ALM potřebuje zhruba 0,3 kW na svou vlastní spotřebu, zbylý výkon je potom rozdělen mezi oba motory. Výkon motoru je závislý na otáčkách ω a momentu M .

$$P = M \cdot \omega \quad (\text{W}; \text{N} \cdot \text{m}; \text{rad} \cdot \text{s}^{-1}) \quad (3.5)$$

Proměnná veličina byl moment působící na hřídel a tím, že otáčky byly konstantní, byla křivka výkonu odebíraného, a posléze dodávaného, u motoru 4 kW téměř lineární. Výkonová křivka ALMu je součtem křivek výkonu pro oba SMM. Když motor 11 kW překročil 1500 otáček, začal motor 4 kW pracovat jako generátor a zde je vidět nesporná výhoda použití komponentů SINAMICS S120. Výkon odebíraný ze sítě klesá a generovaná energie je využita motorem 11 kW.

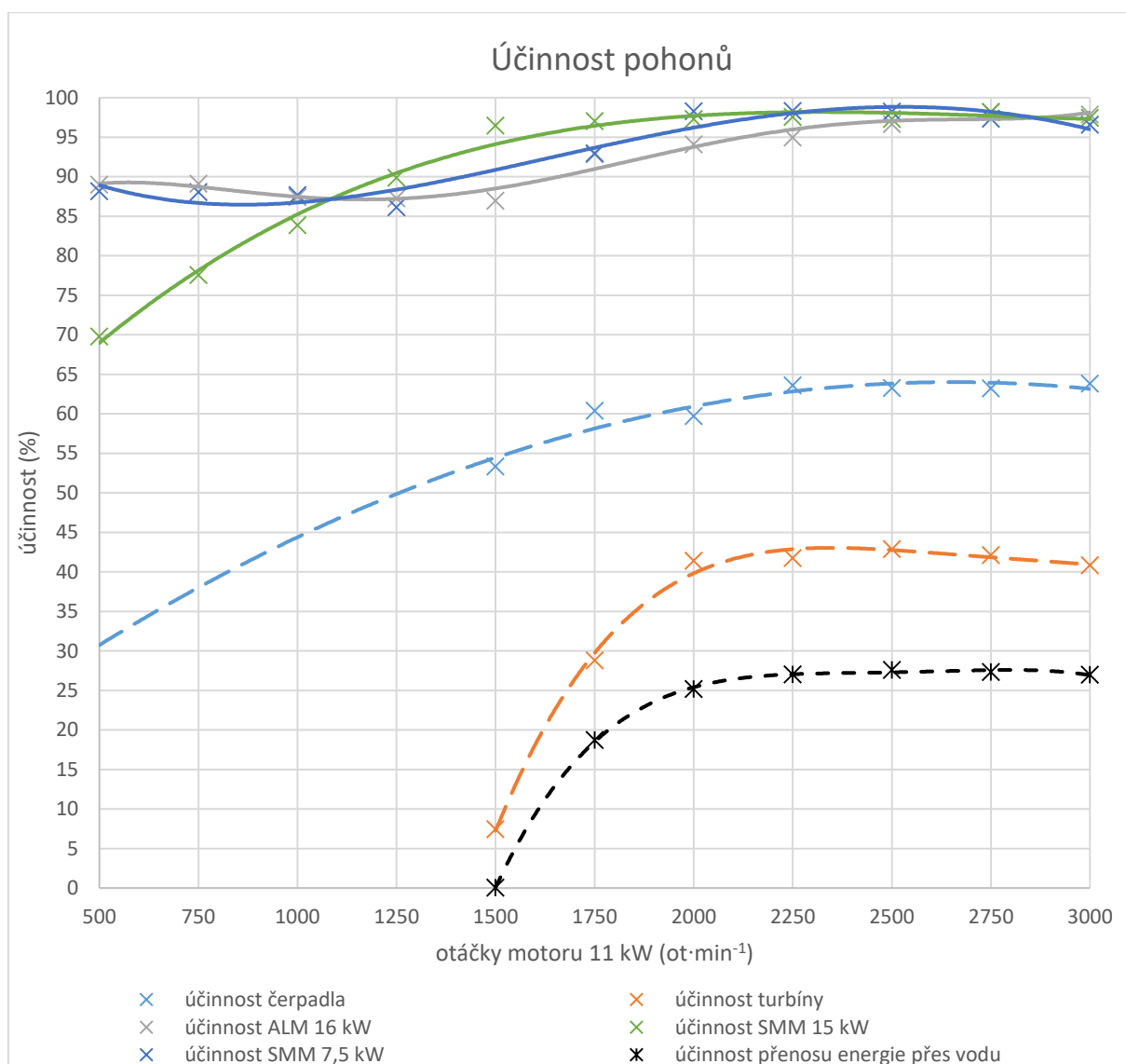
Další zajímavý poznatek z tohoto měření je, že výkon kapaliny je téměř nulový do té doby, než se začne na druhém motoru generovat energie. Motory tož čerpají proti sobě a většina energie se maří v teplo.

Tabulka 3.4 Výkonové parametry použitých měničů řady S120

	výkon	ztráty	účinnost
	P (kW)	ΔP (W)	η (%)
ALM 16 kW	16	282,2	98,2
SMM 15 kW	15	270	98,2
SMM 7,5 kW	7,5	140	98,1

Tabulka 3.4 zobrazuje hodnoty jmenovitých výkonů a ztrát při jmenovitém zatížení uváděné výrobcem, z těchto hodnot byla vypočítána účinnost daných komponent.

Následující obr. 3.9 zobrazuje účinnosti těchto pohonů a také účinnosti čerpadla, čerpadlové turbíny a přenosu výkonu přes vodu.



Obr. 3.9 Přehled účinností

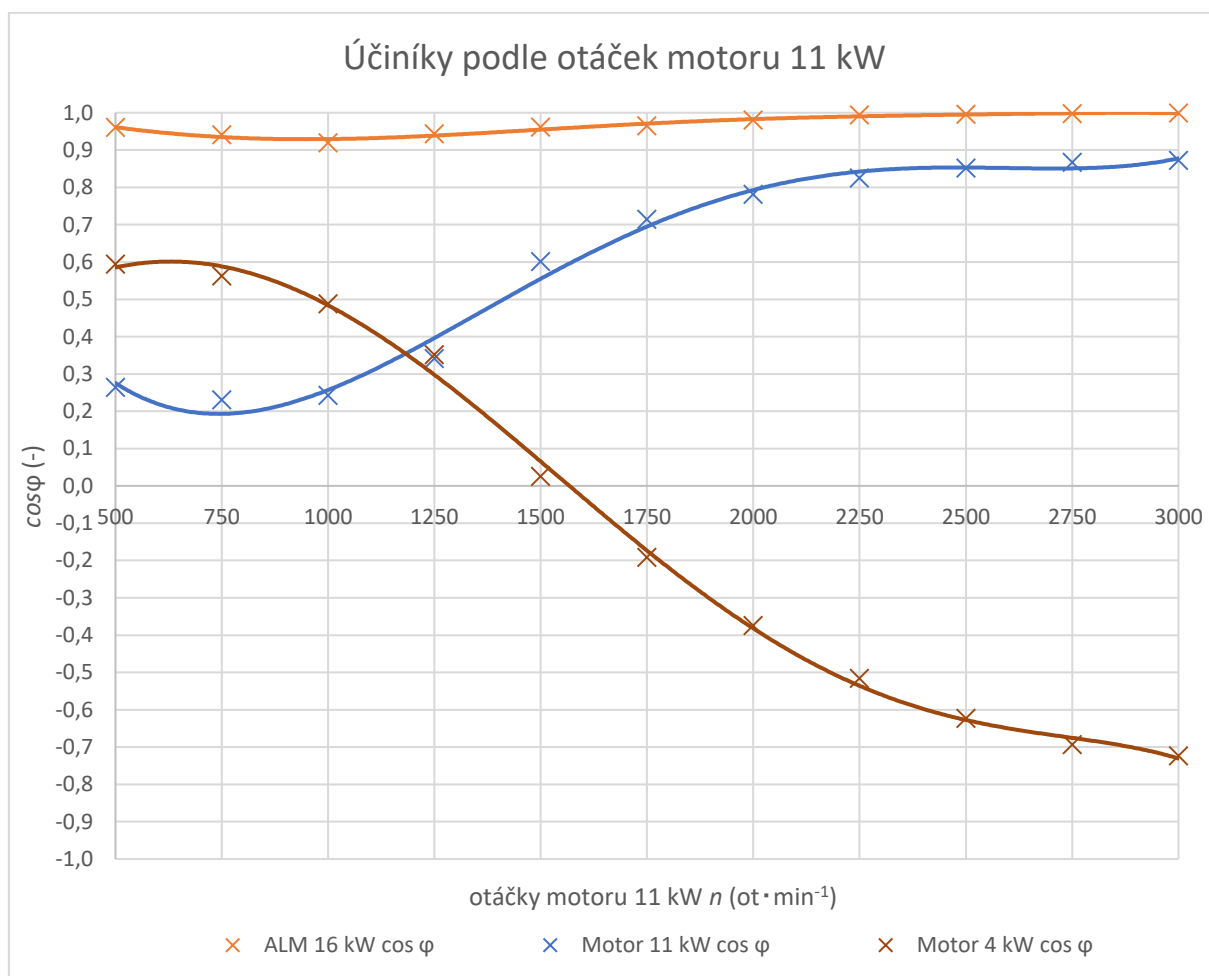
ALM 16 kW při malém zatížení dosahoval účinnosti okolo 90 % a při odběru zhruba 7 kW již dosahoval udávané účinnosti. Jedná se o výkonově nejmenší model této řady a je vidět, že ho lze bez problémů použít i pro aplikace o polovičním výkonu a stále dosahuje takto vysoké účinnosti.

SMM 15 kW měl při odběru do 2 kW velice špatnou účinnost, na čemž se výrazně podepsaly jeho vlastní ztráty, ale při větším odběru se jeho účinnost pohybovala okolo hodnoty garantované výrobcem v překvapivě širokém rozsahu od 2 do 14 kW.

SMM 7,5 kW měl při nižším zatížení také horší účinnost, a to zejména v oblasti, kdy motor začal přecházet do režimu generátoru. Od generovaného výkonu 1 kW a více vykazoval střídač vysokou hodnotu účinnosti téměř shodnou s účinností udávanou výrobcem, přestože byl provozován v generátorickém režimu.

Z naměřených hodnot byla také vypočítána účinnost čerpadla, která dosahuje hodnoty 65 % při jmenovitých otáčkách, což je jen o 3 % méně, než udává výrobce. Tento pokles je s největší pravděpodobností způsoben odporem potrubí vůči proudící vodě (ztracený výkon se mění v teplo). Účinnost čerpadlové turbíny však byla velice nízká, necelých 43 %. Výpočet je bohužel zatížen velkou chybou výpočtu, způsobenou obtížným odečtením měřených hodnot tlaků a průtoku. Dále je potřeba vzít v potaz, že výsledky studií chování čerpadlových turbín říkají, že pro dosažení co největší účinnosti je třeba pracovat s průtoky a otáčkami zvětšenými o koeficient 1,4 až 1,8. To by v případě otáček odpovídalo rozmezí 2000–2600 ot·min⁻¹. Takové měření však provedeno nebylo z obavy poškození motoru nebo celého modelu. Celková účinnost přenosu výkonu z motoru 11 kW na motor 4 kW pomocí vody v tomto modelu MVE byla maximálně 28 %. Největší ztráty jsou potom na straně čerpadla, hlavně čerpadlové turbíny, a také zde hraje roli odpor potrubí vůči proudící vodě.

Za stejných podmínek jako byly popsány v předchozím případě bylo provedeno měření a vyhodnocení účinníku pro ALM a oba motory.

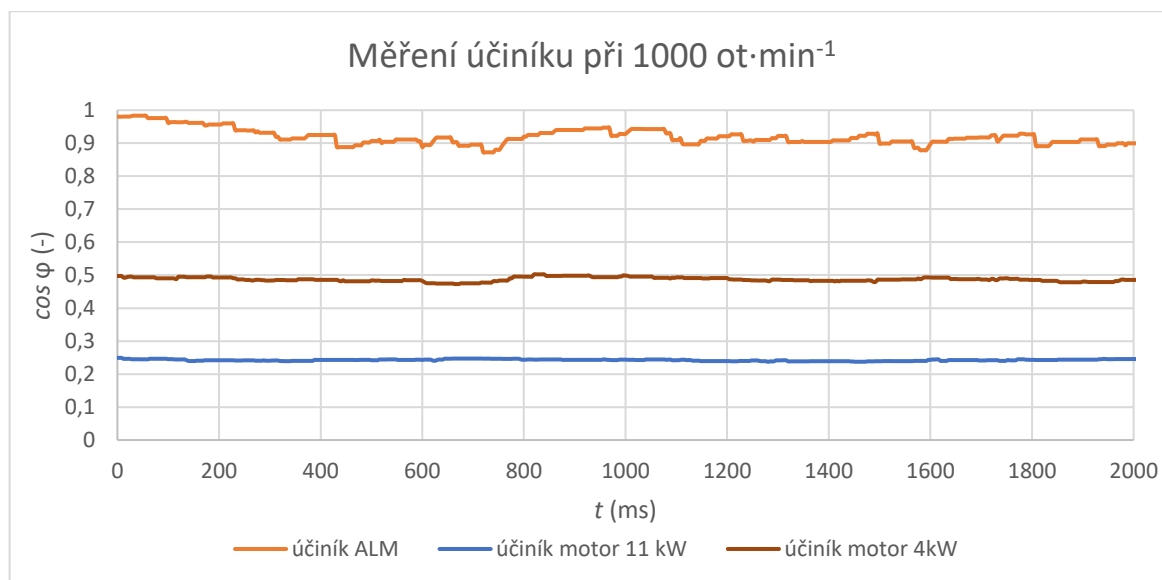


Obr. 3.10 Graf závislosti $\cos \varphi$

Pro ALM 16 kW udává výrobce $\cos\varphi = 1$. Tato skutečnost však neplatí v celém rozsahu odebíraných výkonů, jak ukazuje obr. 3.10. Této hodnoty bylo dosaženo až při výkonu 7 kW a více. Stejně jako pro účinnost.

Účinník motoru 11 kW v okolí jeho jmenovitých otáček dosahuje štítkové hodnoty účinníku. U motoru 4 kW je hezky vidět změna charakteru účinníku, když přechází z motorického do generátorového režimu. Nedosahuje však při svých jmenovitých otáčkách $\cos\varphi$ 0,81, ale pouze 0,72.

Výrobce však udává, že při malé hodnotě odebíraného výkonu nemusí být naměřené hodnoty $\cos\varphi$ věrohodné. Pro ukázkou je na obr. 3.11 zobrazen průběh měření účinníku při 1000 ot·min⁻¹ nastavených na motoru 11 kW. Průběh na měřeném úseku 2000 ms značně kolísá a pro vytvoření grafů byly použity filtrované a zprůměrované hodnoty.

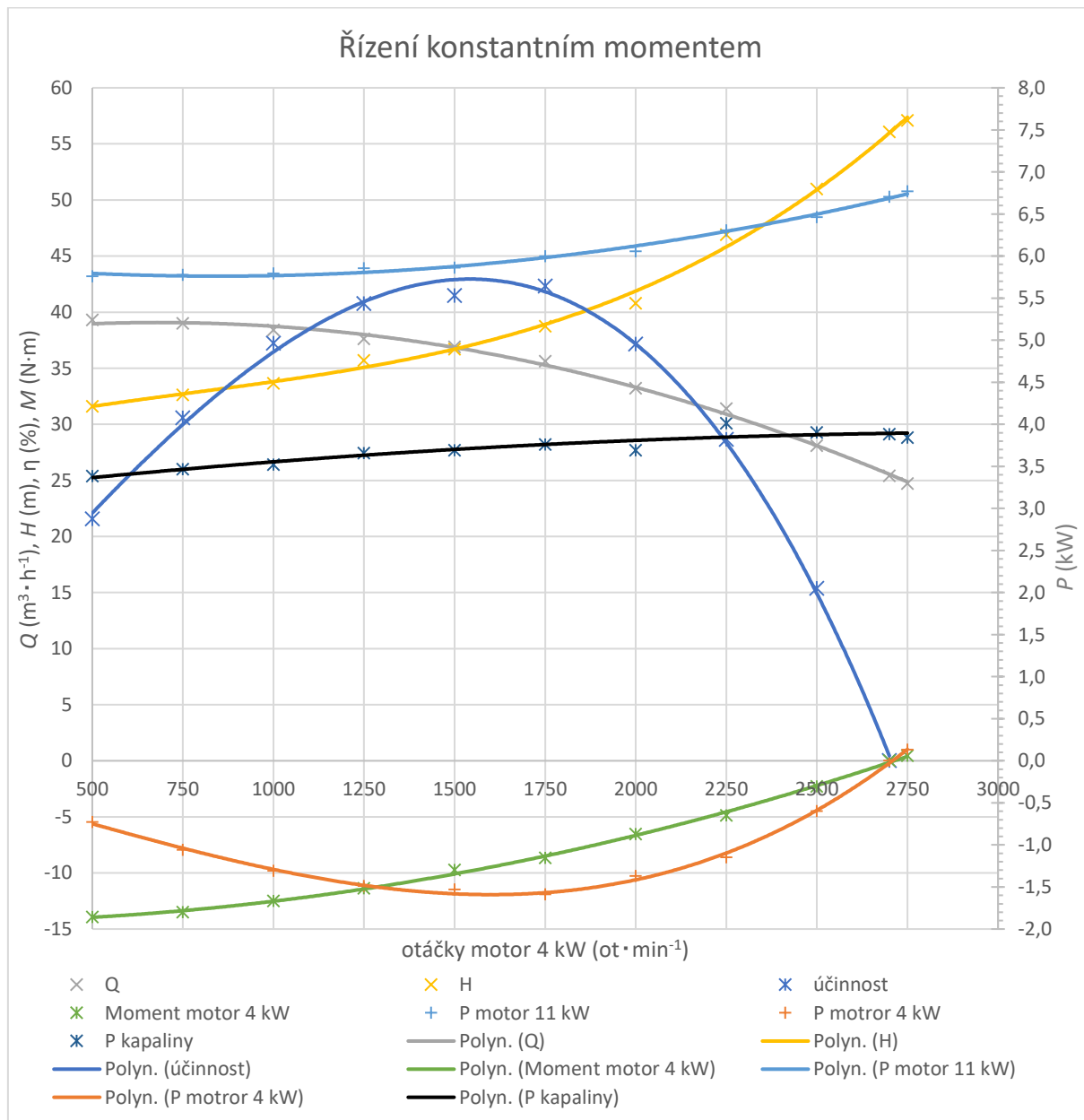


Obr. 3.11 Měření účinníku

Ve snaze vyřešit problém neustálé změny průtoku i tlaku při změně otáček jsme se pokusili zvolit jiný přístup k měření, než byl prováděn doposud, a to nebrat ohled na velikost otáček 11kW motoru, ale zaměřit se na jeho moment. Měnili jsme proto hodnotu žádaných otáček pro motor 4 kW a motoru 11 kW jsme přizpůsobovali otáčky tak, aby byl konstantně zatížen určeným momentem.

Pro následující měření jsme zvolili hodnotu momentu 25 N·m, která bude udržována na hřídeli motoru 11 kW.

Obr. 3.12 potom zobrazuje výsledky tohoto měření.



Obr. 3.12 Graf závislostí sledovaných veličin při řízení konstantním momentem

V tomto případě byly otáčky motoru 4 kW použity jako výchozí veličina. Jejich hodnota byla nastavována od 500 do 2750 ot·min⁻¹. V jejich závislosti jsem potom vynesl hodnoty průtoku, spádu, výkonu motoru 4 kW a 11 kW, momentu motoru 4 kW a účinnost turbíny. Z měření vyplývá, že samotným udržováním momentu motoru 11 kW nelze při proměnlivých otáčkách motoru 4 kW udržet konstantní hodnotu spádu či průtoku. Obě tyto veličiny se po přenastavení otáček motoru 4 kW výrazně změnily. Zatímco se spád při zvětšujících se otáčkách také zvyšoval, průtok soustavou klesal. Alespoň nárůst výkonu kapaliny byl téměř lineární. Motor 11 kW s 25 N·m na hřídeli nebyl schopen dodat dostatečné množství energie vodě proudící systémem. Ta potom nebyla, zvláště při vyšších otáčkách, schopna působit na čerpadlovou turbínu dostatečným momentem. Motor 4 kW proto nebyl schopen generovat velké množství elektřiny. V tomto případě byl nejvyšší dosažený generovaný výkon 1,6 kW při otáčkách 1750 ot·min⁻¹. Dokonce bylo v tomto bodě dosaženo nejvyšší účinnosti. Tento poznatek potvrzuje tvrzení, že odstředivá čerpadla pracující v turbínovém režimu dosahují nejvyšší účinnosti při vyšších otáčkách, než jsou jmenovité. Bohužel spád a průtok nebyly při vyšších otáčkách dostatečné a tím pádem klesal generovaný výkon. Po překročení 2700 ot·min⁻¹, už byl moment působící na motor 4 kW tak malý, že přešel z generátorického režimu do režimu motorického.

Provádění těchto experimentů na současné topologii modelu MVE je poměrně obtížné, málo přesné a vyžaduje nejméně 2 osoby. Výsledky měření ale naznačují, že použití čerpadla 40-NVE-200-LZ-S jako turbíny ve spojení s asynchronním generátorem a vhodným měničem kmitočtu povede k dobrým výsledkům z hlediska efektivity výroby elektrické energie. Je však zapotřebí model modernizovat.

4 Návrh modernizace laboratorního modelu MVE

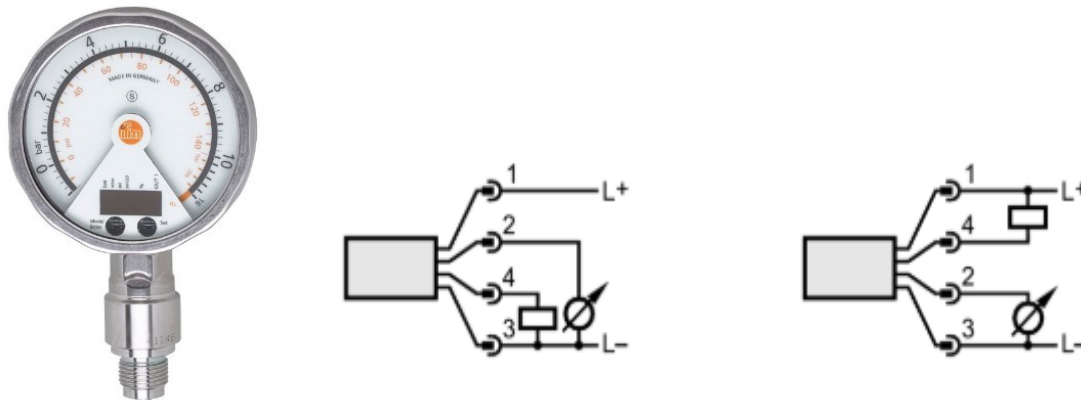
Po zhodnocení měření a konzultaci s vedoucím bakalářské práce jsem pokračoval v návrhu na možnou modernizaci modelu MVE, a tím pádem umožnění jeho využití v budoucnosti, pro vývoj malých vodních elektráren a jejich aplikaci v domácím použití.

4.1 Senzor tlaku

Stávající tlakoměry jsou pouze ručičkové, spíše orientační, při měření s vyššími průtoky dochází k velkému rozkmitu ručičky. Odečítání hodnoty tlaku je proto nepřesné a obtížné.

Cílem je najít vhodnou náhradu, která bude vyžadovat co nejmenší zásahy do stávajícího modelu, umožní přesnější a spolehlivější odečítání tlaku a zároveň dokáže podávat informaci řídicímu systému MVE v reálném čase, a ten bude schopen adekvátně reagovat.

Prošel jsem katalogy různých firem dodávající elektronické tlakoměry a zhodnotil jsem, že vhodný tlakoměr může být například model **PG2454** firmy **ifm**. Měřicí rozsah je -1–16 bar, což je stejný rozsah jako u stávajících manometrů, který je v této aplikaci naprosto dostačující. Má jak analogový, tak digitální ukazatel a disponuje analogovým výstupem 4-20 mA, který bude možno napojit na řídicí systém.



Obr. 4.1 Manometr PG2454 a způsob zapojení OUT1 spínací výstup, OUT2 analogový výstup [25]

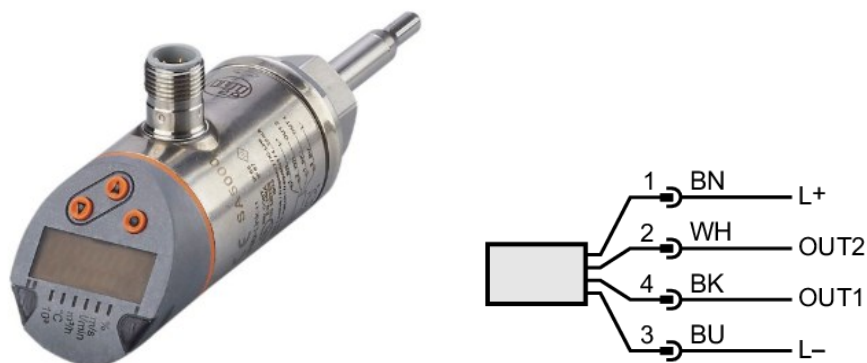
Měření prokázalo, že směrodatné jsou pouze 2 tlakoměry (před a za čerpadlovou turbínou). Navrhuji je proto vyměnit za tento model. Koncovka je stejná, tudíž stačí jen vyšroubovat staré zařízení a našroubovat nové. PG2454 je osazen standardizovanou průmyslovou koncovkou M12, a komunikací IO-Link a jeho výstupy mohou být použity ke spínání nebo k odesílání aktuální hodnoty tlaku.

Podrobné informace o tomto produktu lze nalézt v příloze č. 1.

4.2 Senzor průtoku

Stávající digitální průtokoměr neumožňuje připojení k řídicímu systému, display je špatně čitelný a pro jeho použití bylo potřeba nainstalovat zúžení potrubí z DN 80 na DN 50.

Proto navrhuji jeho nahrazení průtokovým senzorem **SA5000** také firmy **ifm**.



Obr. 4.2 Průtokový senzor SA5000 [26]

SA5000 disponuje také IO-Linkem, spínacími a analogovými výstupy. Kromě měření průtoku umožňuje i měření teploty.

Výměna za současně používaný průtokoměr by spočívala v tom, že by bylo nutné vymontovat zužující kus a nahradit rovným kusem DN 80 s kolmým osazením závitem M18, na který se našroubuje tento senzor.

Pokud bude mít řídicí systém turbínového soustrojí informace o aktuálním průtoku, bude se mu moci přizpůsobit (úprava otáček generátoru).

Podrobné informace o tomto produktu lze nalézt v příloze č.2.

4.3 MVE CONTROL 400

Pro řízení generátoru je zapotřebí použít čtyřkvadrantní měnič kmitočtu o vhodném jmenovitém výkonu, jehož teorie byla rozebrána v kapitole 2.2. Pokud bychom uvažovali simulaci použití generátoru pro domácnost, bylo by také vhodné, kdyby tímto měničem bylo možné napájet akumulátorové baterie.

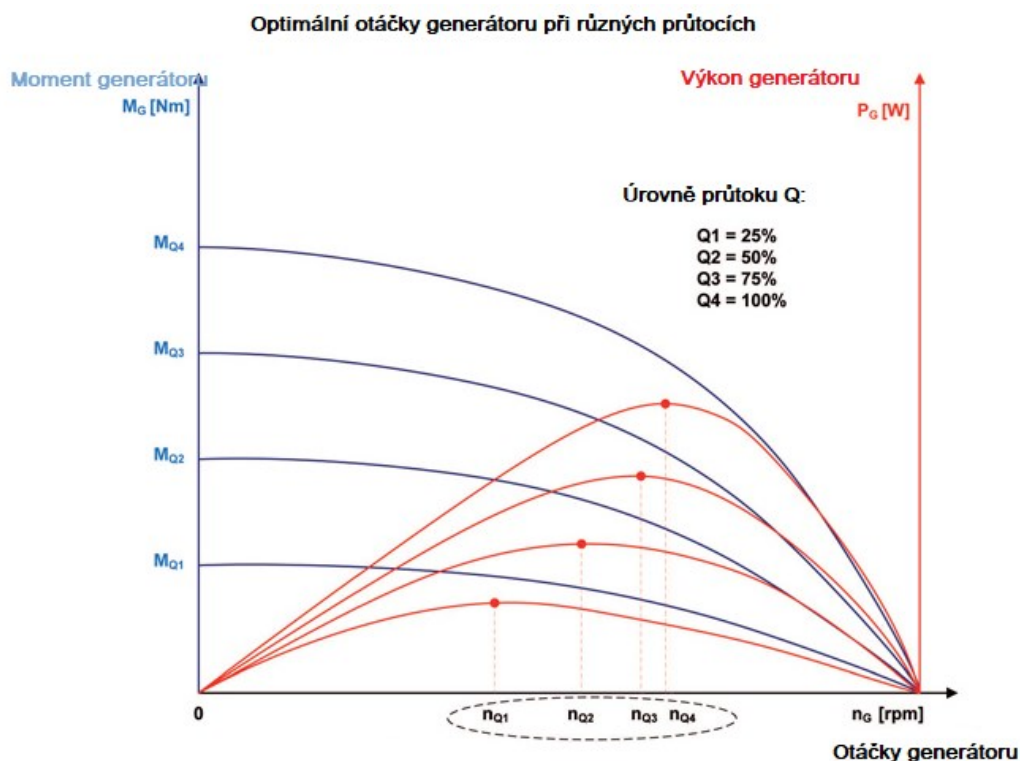
Ve snaze najít optimální řešení jsem narazil na slovenskou firmu VONSCH s.r.o., která se zabývá výkonovou elektronikou pro elektrické pohony, trakci, alternativní zdroje energie jako fotovoltaika, větrné a malé vodní elektrárny a řešením umělých sítí.



Obr. 4.3 MVE CONTROL 400 [27]

Pro řízení malých vodních elektráren, mají ve své nabídce zařízení MVE CONTROL 400 (Obr. 4.3 MVE CONTROL 400). Ten pracuje na principu dvou rekuperačních střídačů, kdy se jeden střídač stará o otáčkovou regulaci generátoru a druhý se stará o dodávku elektřiny do sítě. Instalace MVE CONTROL je vhodná v místech, kde je potřeba se přizpůsobovat proměnlivým průtokovým či spádovým poměrům. Při změně průtoku vody se mění velikost momentu působící na turbínu, pokud je moment moc malý, nelze dosáhnout nadsynchronních otáček a tím pádem generovat elektrickou energii. MVE CONTROL je navržen tak, že automaticky reguluje otáčky generátoru, aby při těchto změnách bylo dosaženo vždy co největšího generovaného výkonu.

Podrobnější informace lze nalézt v příloze č. 3.



Obr. 4.4 Optimální otáčky generátoru, získané systémem VONSCH MVE CONTROL [27]

MVE CONTROL 400 je nabízen ve výkonovém rozmezí od 4 do 500 kW, slouží pro maximalizaci generovaného výkonu a minimalizuje ztráty soustavy. Výrobce také garantuje minimální harmonické zkreslení proudu $THDi < 3 \%$ při $THDu$ sítě $< 1,5 \%$ a $\cos\varphi$ říditelný od -0,95 do 0,95. Neustále je monitorována symetrie fází, stav hladiny, okamžitý výkon, teplota generátoru i samotného zařízení. Dále kontroluje maximální a minimální otáčky, nadproud a zkrat. Disponuje funkcí automatického přifázování generátoru. Má univerzální a plně konfigurovatelné vstupy a výstupy a umí komunikovat například pomocí sběrnice PROFIBUS nebo PROFINET. Tato technologie je také schopna fungovat i v ostrovním režimu s akumulací. [27], [28]

MVE CONTOROL 400 tedy splňuje všechny potřebné požadavky pro modernizaci modelu MVE. Zařízení lze snadno spojit s PC a signály z tlakového a průtokového čidla jdou využít k regulaci řízení generátoru i zdroje vodní energie.

Napojením zařízení MVE CONTROL 400 na motor 4 kW dojde k elektrickému oddělení od motoru 11 kW a doplněním o elektronické senzory tlaku a průtoku se zvýší celkový potenciál využití celého modelu.

Měření prokázalo, že ALM 16 kW i SMM 15 kW pracují s motorem 11 kW dobře a s vysokou účinností. Nové zapojení by proto vyžadovalo minimální změny a náklady.

5 Zapojení elektrických komponent pro modernizaci modelu MVE

Jelikož všechny stávající prvky jsou zapojeny na stole a neexistuje pro toto stanoviště vhodný rozvaděč, rozhodl jsem se vyjít z již dříve navrhovaného zapojení Bc. Schmidta, upravit jej, přidat nově nalezené prvky pro modernizaci modelu a vytvořit nové schéma zapojení pro laboratorní model MVE.

Z původního návrhu zapojení byl odebrán SMM 7,5 kW. O řízení motoru 4 kW (generátor) se bude starat MVE CONTROL 400. V důsledku toho dojde k elektrickému oddělení obou motorů, což doposud způsobovalo při měření velké komplikace. Zároveň MVE CONTROL dokáže vytvořit vlastní elektrickou síť, čehož by bylo možno využít k dalším měřením a budoucímu využití modelu z hlediska simulace vodního zdroje pro výrobu elektrické energie pro domácnost.

Dále jsou přidány 2 elektronické senzory tlaku a nový senzor průtoku. Jelikož všechny tyto senzory disponují IO-Link rozhraním, rozhodl jsem se je využít. Budou připojeny k IO-Link Masteru. Ten dokáže s MVE CONTROL a CU320 komunikovat pomocí PROFINETu. Tento způsob je jednoduchý pro zapojení, spolehlivý a má vysokou dynamiku. Přenosová rychlost PROFINETu je 100 Mbit/s (podle IEC 61784) a pro IO-Link se pohybuje na hladinách 4,8, 38,4 nebo 230,4 kb/s. [29]

Technická dokumentace k zapojení technologie je obsažena v příloze č. 4.

Závěr

Jelikož se rozsah této práce vymyká čistě elektro projekční činnosti, ale zasahuje i do jiných oborů spjatých s malými vodními elektrárnami, jako je mechanika, hydraulika a elektrické pohony, musel jsem se s těmito záležitostmi nejprve blíže seznámit. Jako stěžejní jsem považoval nastudování literatury zabývající se koncepcí malých vodních elektráren.

Laboratorní model MVE využívá jako turbínu odstředivé čerpadlo v inverzním chodu. Zjistil jsem, že zejména v Asii se toto použití stává stále více populární a v posledních letech vznikají nejrůznější studie s touto tematikou. Pro rozbor čerpadlové turbíny jsem proto vycházel primárně ze zahraniční literatury, jejíž poznatky vysvětlují chování a problémy spjaté s tímto modelem, na které narazili již mí předchůdci, ale nezabývali se jimi.

Dále proběhla série několika měření na modelu se stávající topologií, která ukazuje její výhody a nevýhody. Byla stanovena pracovní oblast čerpadlové turbíny. Zobrazil jsem v grafu a zhodnotil jsem výkonové poměry modelu MVE při proměnlivých otáčkách motoru 11 kW, zatímco otáčky motoru 4 kW byly nastaveny na jeho jmenovitou hodnotu. Je zde velice dobře viditelný přechod do generátorického režimu. S tímto grafem je spjat graf zobrazující závislost účinnosti na otáčkách motoru 11 kW (potažmo jeho výkonu). Je zde ověřena pravdivost údajů o účinnosti komponent SINAMICS S120 udávaná výrobcem. Tato informace nám dává povědomí, pro jaké rozsahy výkonů je vhodné tyto konkrétní prvky použít a jak je dimenzovat. Garantované účinnosti čerpadla bylo také dosaženo. To bohužel nemohu tvrdit o předpokládané účinnosti čerpadlové turbíny, která vycházela z poznatků zahraniční literatury. Nejvyšší účinnosti čerpadlové turbíny se pohybovala okolo 43 %. Měření však nedokazuje, že turbína není schopná dosáhnout účinnosti vyšší, protože nebyla provozována při dostatečně vysokých otáčkách. Měření při zvýšených otáčkách však nebylo provedeno, z obavy poškození modelu MVE a komplikovanému, nesnadnému a nepřesnému odečítání měřených hodnot. Dále byly vyneseny hodnoty účinníku pro ALM a oba motory, opět je vidět změna charakteru účinníku při přechodu do generátorického režimu. ALM dosahuje velice dobré hodnoty účinníku, avšak při nízkém odebíraném výkonu nemusí být, podle tvrzení výrobce, tyto hodnoty zcela věrohodné.

Protože docházelo při změně otáček motorů k výrazným změnám průtoku i spádu, byla zvolena jiná metoda, jakou bylo k měření přistupováno. Byl zvolen konstantní moment, který byl na motoru 11 kW udržován po celou dobu měření. Problém se však odstranit nepodařilo, nicméně jsem byl schopen ověřit tvrzení, že odstředivé čerpadlo v inverzním režimu dosahuje nejvyšší účinnosti při otáčkách větších než jmenovitých. Pro přesnější a směrodatnější výsledky by bylo potřeba další měření, které je však při nynějším uspořádání velice komplikované, a ne zcela dobře proveditelné.

Rozhodl jsem se proto navrhnout modernizaci modelu, která zahrnuje osazení modelu dvěma novými elektronickými senzory tlaku a novým senzorem průtoku, abychom byli schopni získávat tyto informace okamžitě ve formě digitálních dat a v reálném čase, se kterými umí pracovat řídicí systém. Další změna by spočívala v kompletním elektrickém oddělení pohonu čerpadla simulujícího vodní zdroj o určitém průtoku a spádu. Jako řešení jsem našel zařízení MVE CONTROL 400, které je navrženo tak, aby řídilo MVE při co největším rozmezí spádů a průtoků v průběhu roku s co největším dosaženým výkonem.

MVE CONTROL je velice specifické zařízení dodávané na míru pro danou aplikaci, v příloze je tedy obsažen obecný popis získaný od výrobce a ilustrační schéma zapojení. Zařízení dokáže pracovat do elektrizační sítě nebo vytvořit síť oddělenou. Pro provoz v ostrovním režimu je možné doplnění o akumulátory.

Pro návrh modernizace modelu MVE jsem vypracoval technickou dokumentaci. Zapojení komponent vychází z původního návrhu Bc. Marka Schmidta. snažil jsem se zachovat co nejvíce původních komponent a doplnit jej o nové technologické prvky.

Pokud by došlo k navrhované modernizaci modelu MVE, bylo by možno navrhnout spolupráci s firmou Vonsch na dalším vývoji tohoto zařízení. Takto osazený model otevírá nové možnosti pro vývoj a výuku řízení elektrických pohonů, vývoj automatizace elektrických instalací a vývoj domácích vodních elektráren s čerpadlovou turbínou. Alternativní zdroje elektrické energie jsou v dnešní době velice aktuální a diskutované téma a ekologicko-politický vývoj společnosti nasvědčuje tomu, že se s takovými zařízeními budeme setkávat stále častěji.

Seznam příloh

Příloha č. 1

Návod k obsluze

Elektronický manometr PG24xx

Příloha č. 2

Návod k obsluze

Senzor proudění SAxx00 SAxx10 SAxx30 SAxx40

Příloha č. 3

MVE CONTROL 400

Popis funkce, ilustrační schéma zapojení

Příloha č. 4

Technická dokumentace pro modernizaci laboratorního modelu MVE

Použitá literatura

- [1] GABRIEL, Pavel, František ČIHÁK a Petr KALANDRA. *Malé vodní elektrárny*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1998. ISBN 80-010-1812-1.
- [2] *Electricity Information 2019*. b.r. ISBN 9789264986350.
- [3] CAGA, Radek. *Řízení laboratorního modelu malé vodní elektrárny* [online]. Ostrava, 2015 [cit. 2020-04-19]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10084/108566>. Diplomová práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.
- [4] HOLATA, Miroslav, Pavel GABRIEL, ed. *Malé vodní elektrárny: projektování a provoz*. Vyd. 1. Praha: Academia, 2002. ISBN 80-200-0828-4.
- [5] DUŠIČKA, Peter. *Malé vodní elektrárny*. 1. vyd. Bratislava: Jaga, 2003. ISBN 80-88905-45-1.
- [6] BEDNÁŘ, Josef. *Malé vodní elektrárny 2: Turbíny*. Praha: SNTL, 1989.
- [7] ENTEC AG. *MICHELL-BANKI TURBINE* [online]. b.r., , 6 [cit. 2020-04-19]. Dostupné z: <https://www.doc-developpement-durable.org/file/Energie/hydraulique/Michell%20Banki%20Turbine.pdf>
- [8] PARRONDO, Jorge L., Sandra VELARDE a Carlos SANTOLARIA. Development of a predictive maintenance system for a centrifugal pump. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*. MCB University Press, 1998, 4(3), 15. ISSN 1355-2511.
- [9] FERNÁNDEZ, J, E BLANCO a J PARRONDO. Performance of a centrifugal pump running in inverse mode. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Part A: Journal of Power and Energy* [online]. 2004, 218(4), 265-271 [cit. 2020-04-19]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1243/0957650041200632>
- [10] RAKIBUZZAMAN, Md, Keum-Young JUNG, Sang-Ho SUH et al. A study on the use of existing pump as turbine. *E3S Web of Conferences* [online]. 2019, 128 [cit. 2020-04-19]. DOI: 10.1051/e3sconf/201912806004. ISSN 2267-1242. Dostupné z: <https://www.e3s-conferences.org/10.1051/e3sconf/201912806004>
- [11] NOSKIEVIČ, Jaromír. *Kavitace v hydraulických strojích a zařízeních*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1990.
- [12] SIGMA GROUP A.S. *NÁVOD K OBSLUZE A MONTÁŽI PRO ODSTŘEDIVÁ HORIZONTÁLNÍ JEDNOSTUPŇOVÁ ČERPADLA NVE*. b.r.
- [13] ŠKODA, Jan. *Asynchronní generátory a jejich využití v praxi* [online]. Hradec Králové, 2016 [cit. 2020-04-19]. Dostupné z: <https://theses.cz/id/s7maht/>. Diplomová práce. Univerzita Hradec Králové, Pedagogická fakulta. Vedoucí práce Doc. PaedDr. René Drtina, Ph.D.

- [14] CHMELÍK, Karel. *ASYNCHRONNÍ A SYNCHRONNÍ ELEKTRICKÉ STROJE*. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2001. ISBN 80-7078-857-7.
- [15] KOČMAN, Stanislav. *ASYNCHRONNÍ STROJE* [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2002 [cit. 2020-04-19]. Dostupné z: http://feil.vsb.cz/kat420/vyuka/Bakalarske_FS/prednasky/sylab_Asynchronni%20stroje_bc%20FS.pdf
- [16] STÝSKALA, Vítězslav a Jan DUDEK. Přednášky – asynchronní motory. *Katedra elektrotechniky* [online]. Ostrava: VŠB-TUO, 2007 [cit. 2020-04-19]. Dostupné z: http://feil.vsb.cz/kat420/vyuka/Bakalarske_FS/prednasky/1_AM_FS.pdf
- [17] CHLEBIŠ, Petr. *Výkonová elektronika I* [online]. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2008 [cit. 2020-04-19]. ISBN 978-80-248-1485-8. Dostupné z: <http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FEI/VEI/Polovodicove%20soucastky.pdf>
- [18] PAVELEK, Tomáš a Václav SLÁDEČEK. *Výkonová elektronika KE* [online]. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2005 [cit. 2020-04-19]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/10066571-Vykonova-elektronika-ke.html>
- [19] KOČMAN, Stanislav. Sylaby k předmětu EMC: Možnosti pro omezování harmonických II. *Katedra elektrotechniky* [online]. Ostrava: VŠB-TUO, 2011 [cit. 2020-04-19]. Dostupné z: http://feil.vsb.cz/kat420/vyuka/FEI/EMC/sylaby/9_Moznosti_pro_omezovani_harmonickych_II.pdf
- [20] SOBEK, Martin. *Výzkum vlastností systému s asynchronním strojem v generátorickém režimu* [online]. Ostrava, 2012 [cit. 2020-04-19]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10084/95852>. Disertační práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.
- [21] NEBORÁK, Ivo a Václav SLÁDEČEK. *ELEKTRICKÉ POHONY: verze 02 a 03 pro kombinované a distanční studium* [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2017 [cit. 2020-04-19]. Dostupné z: <file:///C:/Users/Admin/Downloads/Elektricke%20pohony%20-%20opory.pdf>
- [22] BRANDŠTETTER, P. *Elektrické regulované pohony III: Učební texty pro kombinované a distanční studium na fakultě elektrotechniky a informatiky VŠB-TUO*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2012.
- [23] SIGMA GROUP A.S. *Specifikace velikostí čerpadel* [online]. b.r. [cit. 2020-04-19]. Dostupné z: http://nve.euweb.cz/nve/soubory/NVE/SPEC/40_NVE_200_7.PDF
- [24] SCHMIDT, Marek. *Návrh a realizace zatěžovacího stanoviště pro Elektrické pohony s komponenty firmy Siemens* [online]. Ostrava, 2017 [cit. 2020-04-19]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10084/119170>. Diplomová práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.
- [25] *PG2454 Tlakový senzor s analogovým displejem* [online]. b.r. [cit. 2020-04-19]. Dostupné z:

<https://www.ifm.com/cz/cs/product/PG2454>

- [26] *SA5000 Senzor proudění* [online]. b.r. [cit. 2020-04-19]. Dostupné z: <https://www.ifm.com/cz/cs/product/SA5000>
- [27] *VONSCH s.r.o.* [online]. 2020 [cit. 2020-04-19]. Dostupné z: <https://www.vonsch.sk/>
- [28] VONSCH S.R.O. *MVE CONTROL 400: Popis činnosti + THDi*. 2010.
- [29] IO-Link Communication: Specification. *Automatizace.hw.cz* [online]. b.r. [cit. 2020-04-19]. Dostupné z: https://automatizace.hw.cz/files/images/files/IOL-Comm-Spec_10002_V10_090118.pdf